

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY
A MEZIOBOROVÝCH STUDIÍ**

ÚSTAV MECHATRONIKY A TECHNICKÉ INFORMATIKY

**ANALÝZA STARTŮ ZÁŘIVKOVÉHO
OSVĚTLENÍ S ELEKTROMAGNETICKÝM
PŘEDŘADNÍKEM**

**ANALYSIS OF LAMP STARTS FOR LUMINARIES
WITH ELECTROMAGNETIC BALLAST**

DISERTAČNÍ PRÁCE

ING. ŠOLCOVÁ VERONIKA

LIBEREC, 2010

Téma práce: Analýza startů zářivkového osvětlení s elektromagnetickým předřadníkem

Disertant: Ing. Šolcová Veronika

Studijní program: 2612V Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická Univerzita v Liberci

Školitel: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Děkuji tímto panu Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D., za odborné vedení, pomoc, cenné rady a připomínky nejen v průběhu zpracování této práce, ale i během celého studia. Zároveň děkuji rodině za její podporu a trpělivost.

Veronika Šolcová

Liberec, 10. 12. 2010

Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou životnosti světelných zdrojů, konkrétně životností zářivkového osvětlení, které je z ekonomických důvodů prioritní volbou v mnoha oblastech použití a v současné době tak tvoří asi 78 % umělého světla po celém světě. Životnost světelných zdrojů je zároveň jednou ze základních hledisek moderních osvětlovacích systémů.

Protože je životnost zářivky rozhodujícím způsobem ovlivněna podmínkami, za kterých zářivka startuje, tzn., že je závislá na životnosti všech komponentů, ze kterých sestává, a které jsou ovlivňovány různými činiteli při jejím startu a provozu, je práce konkrétně zaměřena na stavový popis startování/provozu zářivkového tělesa.

V první fázi jsou prezentovány náhradní obvody jednotlivých stavů svítidla s elektromagnetickým předřadníkem během startu: bez napájení, ohřev startéru, žhavení vláken, svícení. Uvedeny jsou výsledky výpočtů komplexních impedancí, které jednotlivé stavy definují.

Následovalo opakované měření startů na souboru dvanácti zářivkových svítidel. Měřenými veličinami byla napětí na tělese, napětí na zářivce, napětí na startéru, dále pak proud tělesa, proud zářivky a světelný tok. Měření byla prováděna na modelu osvětlovací sítě na Ústavu mechatroniky a technické informatiky multikanálovým přístrojem EMU-2 se vzorkovací frekvencí 12,8 kHz.

V druhé fázi byl vytvořen skript v jazyce MATLAB pracující se zaznamenanými oscilogramy z rozběhu zářivkového svítidla, který automaticky vyhledává jednotlivé stavy a detekuje přechody mezi nimi. Podmínky pro detekci stavů byly zjednodušeny tak, aby program mohl bezchybně pracovat jak s obvody s paralelní kompenzací účinníku, tak i kompenzací sériovou (resp. DUO). Program zároveň využívá signály z čidel světelného toku. Výstupem programu jsou doby trvání jednotlivých stavů a četnosti přechodů mezi nimi, dále celková doba a energie žhavení, odpor vláken na konci žhavení a celková energie ohřevu startéru. Uvedené hodnoty jsou určovány jak pro zářivku se standardním osazením elektromagnetickým předřadníkem, tak i s předřadníkem elektronickým.

Výsledkem práce je souhrnná analýza stavových diagramů a histogramů četností dob trvání jednotlivých stavů v závislosti na napájecím napětí zářivkových těles obou kompenzací.

Abstract

The dissertation thesis deals with lifetime problems of luminaries, concretely with lifetime of fluorescent lamps, which are the foreground selection in many application field due to the economic aspect and there are make about 78 % of candlelight all over the world today. The lifetime of luminaries is also one of the basic aspects for modern lighting systems.

Because, the lifetime of fluorescent lamp is decisively affected by the start lamp conditions, it means it depends on the lifetime of all components of fluorescent lamp, which are affected by various factors on the fluorescent lamp start and function, is the thesis concretely aimed at the state description of fluorescent lamp start/function.

In the first part are presented the substitution circuits of individual states for lamp with the electromagnetic gear in process of start: no supply, starter rating, filaments glowing and lightening. There are the results of complex impedance computations mentioned, which define these individual states.

It followed the start remeasurement of the twelve fluorescent lamps file. The measured values were illuminator voltage, lamp voltage, start voltage, next illuminator current, lamp current and luminous flux. The measurements were realized on lighting main model on Institute of Mechatronics and Computer Engineering and were performed by the multi-channel device EMU-2 with sampling frequency of 12,8 kHz.

In the second part was created the MATLAB script. The script works with recorded oscillograms from fluorescent lamp start, and it automatically retrieves the individual states and detects the transitions between them. The conditions for state detection were generalized so the program could perfectly work both with parallel compensation circuits and with series or DUO compensation circuits. The program exploits the luminous flux sensor signals too. Program output are individual states time and transitions frequency between them, next heating total time and heating energy, filaments resistance at the end of heating and total energy of starter heating.

These mentioned values are determined both for fluorescent lamp with the standard electromagnetic gear and with the electronic gear.

The gain of the dissertation thesis is the overall analysis of the state diagrams and frequency histograms of individual states time in dependence on supply voltage of fluorescent lamps of both compensations.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	14
1 ÚVOD	15
1.1 SOUČASNÝ STAV VE VÝZKUMU ZÁŘIVKOVÉHO OSVĚTLENÍ.....	16
1.2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	17
1.3 STRUKTURA PRÁCE	18
2 ZÁŘIVKA JAKO SVĚTELNÝ ZDROJ	20
2.1 OBLASTI VYUŽITÍ ZÁŘIVEK A JEJICH VÝROBA.....	20
2.2 PRVKY ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA	21
2.3 PŘEDŘADNÍK	21
2.3.1 Typy předřadníků.....	22
2.3.2 Standardizace statického odporu a energie potřebná pro předžhavení elektrod zářivky	25
2.3.3 Nutnost použití předřadníku u zářivek.....	31
2.3.4 Hlavní funkce předřadníku.....	32
2.4 ZPŮSOBY ZAPÁLENÍ VÝBOJE	33
2.4.1 Startér.....	34
2.4.2 Stabilizace zářivky a typy stabilizačních prvků	38
2.5 VÝBOJOVÁ TRUBICE	42
2.5.1 Světelně technické parametry	45
2.5.2 Životnost zářivky.....	45
2.6 KOMPENZAČNÍ KONDENZÁTOR	51
3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ KOMPONENT OBVODU SVÍTIDLA, NÁHRADNÍ OBVODY PRO STAVY STARTU	62
3.1 KAPACITA KONDENZÁTORU	63
3.2 ODPOR VLÁKEN	64
3.3 ODPOR STARTÉRU	64
3.4 INDUKČNOST A ODPOR TLUMIVKY.....	65
3.5 NÁHRADNÍ OBVOD ZÁŘIVKOVÉ TRUBICE.....	65
3.6 VÝSLEDNÉ IMPEDANCE NÁHRADNÍCH OBVODŮ V JEDNOTLIVÝCH STAVECH.....	66
4 MĚŘENÍ STARTŮ ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA.....	67
4.1 SKRIPT V JAZYCE MATLAB	72

4.2	STAVOVÝ DIAGRAM STARTU ZÁŘIVKOVÉHO SVÍTIDLA.....	78
4.2.1	<i>Sepnutí kontaktů startéru + odskok kontaktů</i>	80
4.2.2	<i>Odskok kontaktů.....</i>	82
4.2.3	<i>Zapálení výboje zářivky (paralelní kompenzace)</i>	82
4.2.4	<i>Zapálení výboje zářivky (sériová kompenzace).....</i>	83
4.2.5	<i>Neúspěšné zapálení zářivky.....</i>	84
4.2.6	<i>Opětovné sepnutí kontaktů startéru</i>	85
4.2.7	<i>Zapálení zářivky s nedostatečně nažhavenými elektrodami</i>	86
4.3	ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI JEDNOTLIVÝMI STAVY.....	87
4.4	HISTOGRAMY DOB TRVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH STAVŮ.....	94
4.4.1	<i>Ohřev startéru</i>	95
4.4.2	<i>Žhavení</i>	97
4.4.3	<i>Svícení.....</i>	107
4.4.4	<i>Celková doba trvání startu zářivky</i>	109
5	MĚŘENÍ STARTŮ ZÁŘIVKY S ELEKTRONICKÝM PŘEDŘADNÍKEM	114
6	ZÁVĚR.....	117
7	CITOVANÁ LITERATURA.....	120
8	PŘÍLOHY	129
8.1	PARAMETRY NÁHRADNÍHO OBVODU SVÍTIDLA S ELEKTROMAGNETICKÝM PŘEDŘADNÍKEM	129
8.2	NÁHRADNÍ OBVODY PRO SVÍTIDLO S PARALELNÍ KOMPENZACÍ	134
8.2.1	<i>Ohřev startéru</i>	134
8.2.2	<i>Žhavení</i>	135
8.2.3	<i>Svícení.....</i>	135
8.2.4	<i>Vypnutí</i>	136
8.2.5	<i>Odskok kontaktů.....</i>	136
8.3	NÁHRADNÍ OBVODY PRO SVÍTIDLO SE SÉRIOVOU (DUO) KOMPENZACÍ.....	137
8.3.1	<i>Ohřev startéru</i>	137
8.3.2	<i>Žhavení</i>	137
8.3.3	<i>Svícení.....</i>	138
8.4	ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI JEDNOTLIVÝMI STAVY.....	139
8.5	START ELEKTRONICKÉHO PŘEDŘADNÍKU	141

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	AMPLITUDA
ANSI	“AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE“, OZNAČENÍ PRO AMERICKOU NORMU
B ₁ , B ₂	ZÁŘIVKY S POŠKOZENÝMI ELEKTRODAMI
c	TEPELNÁ KAPACITA
C	KAPACITA KOMPENZAČNÍHO KONDENZÁTORU
CE	„COMMUNITÉ EUROPÉEN“, TJ. EVROPSKÉ SPOLEČENSTVÍ, OZNAČENÍ PRO EVROPSKOU NORMU
CFL	„COMPACT FLUORESCENT LIGHT“, TYP ZÁŘIVKY
$\cos \varphi$	ÚČINÍK
DUO	OZNAČENÍ PRO ZAPOJENÍ OBVODU SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ
E	INTENZITA OSVĚTLENÍ
E (t)	ENERGIE PRO PŘEDŽHAVENÍ ELEKTROD
EMC	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA
ESČ	„ELEKTROTECHNICKÝ SVAZ ČESKÝ“, OZNAČENÍ PRO ČESKOU NORMU
f	FREKVENCE
I	KONSTANTNÍ PROUD Z NAPÁJECÍHO ZDROJE
I ₁	PROUD ZÁŘIVKOU BEZ KOMPENZACE
I _{1j} , I _{2j}	JALOVÉ PROUDY PŘED A PO KOMPENZACI
I ₂	PROUD ZÁŘIVKOU PO KOMPENZACI
I _Č	ČINNÝ PROUD (VE FÁZI S NAPĚTÍM)
IEC	„INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION“, OZNAČENÍ PRO MEZINÁRODNÍ ELEKTROTECHNICKOU NORMU
I _K	KOMPENZAČNÍ PROUD
I _{LAMP}	PROUD ZÁŘIVKY
Im (Z)	IMAGINÁRNÍ SLOŽKA IMPEDANCE
I _{TĚLESO}	PROUD TĚLESA
k	ABSOLUTNÍ ČETNOST JEVU A
k/n	RELATIVNÍ ČETNOST JEVU
L	INDUKČNOST TLUMIVKY
L ₁	TLUMIVKA KATEGORIE C
L ₂	TLUMIVKA KATEGORIE B
L _{LAMP}	INDUKČNOST VÝBOJE ZÁŘIVKY
MKP, MKV	OZNAČENÍ MODERNÍ TECHNOLOGIE PRO VÝROBU KOMPENZAČNÍCH KONDENZÁTORŮ
P	ČINNÝ VÝKON
P (A)	STATISTICKÁ PRAVDĚPODOBNOST JEVU A
P (t)	OKAMŽITÝ VÝKON
PF	„POWER FACTOR“, ÚČINÍK
PFC	„POWER FACTOR CORRECTION“, KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU

PL-C	TYPOVÉ OZNAČENÍ LINEÁRNÍ ZÁŘIVKY
PTC	POSITIVNÍ TEPLOTNÍ CHARAKTERISTIKA
P_{VSTUP}	VSTUPNÍ VÝKON
$P_{\text{ZTRÁT}}$	ZTRÁTOVÝ VÝKON
Q	JALOVÝ VÝKON
Q_C	JALOVÝ VÝKON POŽADOVANÉHO KOMPENZAČNÍHO KONDENZÁTORU
$Q_{\text{ELEKTRODY}}$	TEPLO OBSAŽENÉ NA ELEKTRODĚ
Q_{LAMP}	JALOVÝ VÝKON VÝBOJE ZÁŘIVKY
R_C	ODPOR VLÁKNA PŘI POKOJOVÉ TEPLOTĚ
$R_e (Z)$	REÁLNÁ SLOŽKA IMPEDANCE
$R_{\text{ELEKTROD}} (t)$	ODPOR ELEKTRODY
R_H / R_C	POMĚR ODPORŮ
R_H	ODPOR VLÁKNA PŘI ZVÝŠENÉ TEPLOTĚ
R_{LAMP}	ODPOR VÝBOJE ZÁŘIVKY
$R_{\text{STARTÉRU}}$	ODPOR STARTÉRU
$R_{\text{VLÁKEN}}$	ODPOR VLÁKEN ZÁŘIVKY
S_{LAMP}	ZDÁNlivÝ VÝKON VÝBOJE ZÁŘIVKY
T	INTEGRAČNÍ PERIODA - DOBA PERIODY, ČI PŮLPERIODY
t	ČAS
U	KONSTANTNÍ NAPÁJECÍ NAPĚTÍ
U_{LAMP}	NAPĚTÍ NA ZÁŘIVCE
U_{LAMP}	NAPĚTÍ NA ZÁŘIVCE
U_{MIN}	MINIMÁLNÍ NAPÁJECÍ NAPĚTÍ
U_{NAP}	SÍŤOVÉ NAPÁJECÍ NAPĚTÍ
U_{SNET}	SINUSOVÉ NAPÁJECÍ NAPĚTÍ
U_{ST}	NAPĚTÍ NAINDUKOVANÉ VE VINUTÍ TLUMIVKY (NA STABILIZAČNÍM PRVKU)
U_{START}	NAPĚTÍ NA STARTÉRU
$U_{\text{TĚLESO}}$	NAPĚTÍ NA TĚLESE
$U_{\text{ZÁPAL}}$	ZÁPALNÉ NAPĚTÍ STARTÉRU
V_{PEAK}	ŠPIČKOVÁ HODNOTA TESTOVACÍHO NAPĚTÍ
V_{RMS}	EFEKTIVNÍ HODNOTA TESTOVACÍHO NAPĚTÍ
X_L	REAKTANCE TLUMIVKY
Z	IMPEDANCE
Z_1, Z_2	IMPEDANCE PŘÍSLUŠNÉ VĚTVE NÁHRADNÍHO OBVODU V JEDNOTLIVÝCH STAVECH ROZBĚHU ZÁŘIVKY
Z_C	CELKOVÁ IMPEDANCE SVÍTIDLA
Z_L, Z_R	IMPEDANCE JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ V NÁHRADNÍCH OBVODECH
$Z_{Rvl}, Z_{\text{Rstart}}$	IMPEDANCE JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ V NÁHRADNÍCH OBVODECH
Z_{ST}	IMPEDANCE STABILIZAČNÍHO PRVKU
ΔT	ROZDÍL TEPLOT

ANALÝZA STARTŮ ZÁŘIVKOVÉHO OSVĚTLENÍ S ELEKTROMAGNETICKÝM PŘEDŘADNÍKEM

σ	PARAZITNÍ VLIVY
φ	FÁZOVÝ POSUN
φ_1, φ_2	FÁZOVÝ POSUN PŘED A PO KOMPENZACI
ω	ÚHLOVÁ FREKVENCE

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 2.1: VLEVO PROUD SKLA VYTÉKAJÍCÍ Z TAVÍCÍ PECE, VPRAVO OPERACE ZÁTAVU TRUBICE A NOŽKY, ČERPÁNÍ A PLNĚNÍ ZÁŘIVKY [KOT08]	20
OBRÁZEK 2.2: ZAMĚŠTNANEC VÝROBNÍ LINKY DOHLÍŽÍ NA PROCES TESTOVÁNÍ HOTOVÝCH ZÁŘIVEK [KOT08]	21
OBRÁZEK 2.3: SCHÉMA ZAPOJENÍ ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA S ELEKTROMAGNETICKÝM PŘEDŘADNÍKEM A PARALELNÍ KOMPENZACÍ [ŠOL05A]	22
OBRÁZEK 2.4: ZLEVA INDUKČNÍ PŘEDŘADNÍK ŘADY BTA OD FIRMY PHILIPS, VPRAVO PŘEDŘADNÍK ŘADY PLC OD FIRMY BRILUX [STA99]	23
OBRÁZEK 2.5: POROVNÁNÍ FUNKCE PŘEDŘADNÍKŮ [DAŠ02]	23
OBRÁZEK 2.6: ELEKTRONICKÝ PŘEDŘADNÍK ŘADY GFC OD FIRMY ELGO [STA99]	25
OBRÁZEK 2.7: ZÁVISLOST POMĚRU ODPORŮ R_H/R_C NA TEPLITĚ WOLFRAMOVÉHO VLÁKNA [DOR02]	26
OBRÁZEK 2.8: A) VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA KATODY PRO 2G11 36 W, B) ZÁVISLOST POMĚRU ODPORŮ NA VÝKONU PRO KATODU 2G11 36 W [DOR02]	26
OBRÁZEK 2.9: PRACOVNÍ OBLAST DOPORUČENÁ PRO PŘEDŽHAVENÍ [WAK06]	27
OBRÁZEK 2.10: NAPĚTÍ STARTU U_{START} JAKO FUNKCE TEPLoty ELEKTRODY, KDE BOD "E" ZNAČÍ TEPLITU, PŘI KTERÉ DOCHÁZÍ K EMISI ELEKTRONŮ [APP00]	28
OBRÁZEK 2.11: ENERGIE PRO PŘEDŽHAVENÍ CLF ZÁŘIVEK, KONKRÉTNĚ PRO PL - C 26 W [DOR02]	29
OBRÁZEK 2.12: NAVÝŠENÍ POMĚRU ODPORŮ R_H / R_C U PL-C 26 W ELEKTRODY V ZÁVISLOSTI NA ČASE; PŘI ŽHAVENÍ S KONSTANTNÍM PROUDEM 460 mA NEBO S KONSTANTNÍM NAPĚTÍM 3,8 V [DOR02]	30
OBRÁZEK 2.13: STATICKÁ VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA VÝBOJOVÉHO ZDROJE [APP00].	31
OBRÁZEK 2.14: DOUTNAVKOVÝ STARTÉR S BIMETALOVÝMI ELEKTRODAMI A ODRUŠOVACÍM KONDENZÁTOREM (cca 5 nF), KTERÝ OMEZUJE RUŠENÍ (INTERFERENCI) ZÁŘIVKY A ZLEPŠUJE ZAPALOVACÍ PODMÍNKY [TKO02]	34
OBRÁZEK 2.15: TYPY KLASICKÝCH DOUTNAVKOVÝCH STARTÉRŮ PHILIPS S2, S10 [STA99]	36
OBRÁZEK 2.16: TYPY ELEKTRONICKÝCH STARTÉRŮ PHILIPS S2- E, S10-E [STA99]	37
OBRÁZEK 2.17: VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA ZÁŘIVKY ZAPOJENÉ DO SÉRIE SE STABILIZAČNÍM PRVKEM, DÍKY KTERÉMU POŽADOVANÉ NAPĚTÍ NA ZÁŘIVCE (LAMPĚ) VZRŮSTÁ S ROSTOUCÍM PROUDEM LAMPY; NÁSLEDKEM JE STABILNÍMU STAV [APP00].	39
OBRÁZEK 2.18: OBLAST VÝBOJE ZÁŘIVKY A NAPĚŤOVÁ CHARAKTERISTIKA PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPÁJENÍ [ŠOL04]	43
OBRÁZEK 2.19: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA MNOŽSTVÍ EMISNÍ HMOTY NANESENÉ NA ELEKTRODĚ (KATODĚ) [KIN64]	46
OBRÁZEK 2.20: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA TLAKU ARGONOVÉ NÁPLNĚ [KIN64]	47
OBRÁZEK 2.21: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA PRACOVNÍM PROUDU [KIN64]	47
OBRÁZEK 2.22: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA POČTU HODIN SVÍCENÍ PŘIPADAJÍCÍCH NA JEDNO ROZSVÍCENÍ [KIN64]	48
OBRÁZEK 2.23: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA TVARU PROUDOVÉ KŘIVKY [KIN64]	49
OBRÁZEK 2.24: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA POČTU STUDENÝCH (MŽITKOVÝCH) STARTŮ [KIN64]	49
OBRÁZEK 2.25: ZÁVISLOST DOBY ŽIVOTA ZÁŘIVKY NA VELIKOSTI ŽHAVÍCÍHO PROUDU [KIN64]	50
OBRÁZEK 2.26: STANDARDNÍ A NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ZÁŘIVKOVÉHO SVÍTLIDLA S PARALELNÍM FILTRAČNÍM KONDENZÁTOREM	

VČETNĚ FÁZOROVÉHO DIAGRAMU. [KOL07]	53
OBRÁZEK 2.27: ZÁŘIVKOVÉ SVÍTIDLO V DUO ZAPOJENÍ SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ ÚČINÍKU.....	54
OBRÁZEK 2.28: KONSTRUKCE SAMOREGENERAČNÍHO KONDENZÁTORU [KOM07]	55
OBRÁZEK 2.29: NAPĚŤOVÝ PRŮRAZ V KONDENZÁTORU [KOM07].....	56
OBRÁZEK 2.30: PRŮBĚH KAPACITY A VNITŘNÍ TEPLoty KONDENZÁTORU V ZÁVISLOSTI NA ČASE [MON99]	57
OBRÁZEK 2.31: VLIV TEPLoty A PRACOVNÍHO NAPĚTÍ NA ŽIVOTNOST FÓLIOVÝCH KONDENZÁTORŮ [ESO10]	58
OBRÁZEK 2.32: ZÁVISLOST KAPACITY NA TEPLotĚ U KONDENZÁTORŮ S POLYPROPYLENOVOU FÓLÍÍ [ESO10]	58
OBRÁZEK 2.33: TYPY PARALELNÍCH ZÁŘIVKOVÝCH KONDENZÁTORŮ: ZLEVA TC884, TL201, UNICOMP LCP0040022, ELEKTRONICON; 250V AC, 50/60Hz. [KON03], [KOM06A], [PAR09]	59
OBRÁZEK 2.34: MKV KONDENZÁTOR OD FIRMY EPCOS [KOM07]	61
OBRÁZEK 3.1: SCHÉMA ZAPOJENÍ JEDNOHO SVÍTIDLA V MODELU OSVĚTLOVACÍ SÍŤE	63
OBRÁZEK 3.2: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ KAPACITY KONDENZÁTORU.....	64
OBRÁZEK 4.1: MODEL OSVĚTLOVACÍ SÍŤE.....	67
OBRÁZEK 4.2: MĚŘICÍ PRACOVNÍSTĚ – EMU-2 NAHOŘE, VÝKONOVÝ ZDROJ PRC 2000LA DOLE	69
OBRÁZEK 4.3: BLOKOVÝ DIAGRAM POPISOVANÉHO MĚŘENÍ.....	70
OBRÁZEK 4.4: ČASOVÝ PRŮBĚH MĚŘENÍ	71
OBRÁZEK 4.5: STRUČNÝ VÝVOJOVÝ DIAGRAM VYHODNOCOVAČÍHO PROGRAMU.....	73
OBRÁZEK 4.6: STAVOVÝ DIAGRAM ZAPALOVÁNÍ ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA.....	79
OBRÁZEK 4.7: ZÁZNAM PRŮBĚHU STARTU ZÁŘIVKY V ZAPOJENÍ S PARALELNÍ KOMPENZACÍ (CPL1) DLE OBR. 2.3. TLUMIVKA DFT 5336 KATEGORIE C, NAPÁJENÍ 230 V	80
OBRÁZEK 4.8: ZMĚNA OBVODOVÝCH VELIČIN PŘI SEPNUTÍ KONTAKTŮ STARTÉRU U PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU (CPL1)	81
OBRÁZEK 4.9: ODSKOK KONTAKTŮ U SÉRIOVÉ KOMPENZACE ÚČINÍKU (CSL1).....	82
OBRÁZEK 4.10: ZMĚNA OBVODOVÝCH VELIČIN PŘI ROZEPNUTÍ KONTAKTŮ STARTÉRU U PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU (CPL1).....	82
OBRÁZEK 4.11: PŘECHOD „ŽHAVENÍ – SVÍCENÍ“ U SÉRIOVÉ KOMPENZACE (CSL1)	84
OBRÁZEK 4.12: PŘECHOD „ŽHAVENÍ – OHŘEV STARTÉRU“, TJ. NEÚSPĚŠNÝ ZÁPAL VÝBOJE ZÁŘIVKY (CPL1)	84
OBRÁZEK 4.13: PŘECHOD „ŽHAVENÍ – SVÍCENÍ – OHŘEV STARTÉRU“, TJ. NEÚSPĚŠNÝ ZÁPAL VÝBOJE ZÁŘIVKY (CPL1).....	85
OBRÁZEK 4.14: NESTANDARDNÍ PŘECHOD „ŽHAVENÍ – SVÍCENÍ“ A „SVÍCENÍ – ŽHAVENÍ“, PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU (CPL1).....	86
OBRÁZEK 4.15: SVÍCENÍ S NÍZKOU TEPLotOU ELEKTROD (CPL1)	87
OBRÁZEK 4.16: STAVOVÝ DIAGRAM ZAPALOVÁNÍ ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA S ČETNOSTMI PŘECHODŮ MEZI STAVY, ZÁŘIVKA S PARALELNÍ KOMPENZACÍ ÚČINÍKU (CPL1) A NAPÁJENÍM $U_{TĚLESO} = 230\text{ V}$, SVÍTIDLO 11, 50 MĚŘENÍ	88
OBRÁZEK 4.17: STAVOVÝ DIAGRAM ZAPALOVÁNÍ ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA S ČETNOSTMI PŘECHODŮ MEZI STAVY, ZÁŘIVKA SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ (CSL1) ÚČINÍKU A NAPÁJENÍM $U_{TĚLESO} = 230\text{ V}$, SVÍTIDLO 11, 50 MĚŘENÍ.....	91
OBRÁZEK 4.18: ZÁVISLOST MEDIÁNŮ CELKOVÉ DOBY ŽHAVENÍ NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY KOMPENZACE ÚČINÍKU, VLEVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLA 1÷12 (10×12×5×5 MĚŘENÍ), VPRAVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLO 11 (50×5×5 MĚŘENÍ)“	93

OBRÁZEK 4.19: ZÁVISLOST MEDIÁNŮ DOBY 1. ÚSEKU ŽHAVENÍ NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY KOMPENZACE ÚČINÍKU, VLEVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLA 1÷12 (10×12×5×5 MĚŘENÍ), VPRAVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLO 11 (50×5×5 MĚŘENÍ)	93
OBRÁZEK 4.20: ZÁVISLOST ŽHAVICÍHO PROUDU NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY KOMPENZACE ÚČINÍKU, VLEVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLA 1÷12 (10×12×5×5 MĚŘENÍ), VPRAVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLO 11 (50×5×5 MĚŘENÍ)	94
OBRÁZEK 4.21: ČETNOST DOBY TRVÁNÍ STAVU „OHŘEV STARTÉRU“ BĚHEM 12× 10 STARTŮ SVÍTIDEL 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	96
OBRÁZEK 4.22: ČETNOST DOBY TRVÁNÍ STAVU „OHŘEV STARTÉRU“ BĚHEM JEDNOHO STARTU SVÍTIDLA 11 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	97
OBRÁZEK 4.23: ČETNOST DOBY TRVÁNÍ STAVU „ŽHAVENÍ VLÁKEN TRUBICE“ BĚHEM 12× 10 STARTŮ SVÍTIDEL 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	98
OBRÁZEK 4.24: ČETNOST DOBY TRVÁNÍ STAVU „ŽHAVENÍ VLÁKEN TRUBICE“ BĚHEM JEDNOHO STARTU SVÍTIDLA 11 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	99
OBRÁZEK 4.25: ČETNOST POČTŮ ŽHAVENÍ BĚHEM JEDNOHO STARTU ZÁŘIVKY , ZE 12×10 STARTŮ NA SVÍTIDLECH 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	100
OBRÁZEK 4.26: ČETNOST POČTŮ ŽHAVENÍ BĚHEM JEDNOHO STARTU ZÁŘIVKY NA SVÍTIDLE 11 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	101
OBRÁZEK 4.27: POMĚR ODPORU R_H/R_C V ZÁVISLOSTI NA CELKOVÉ DOBĚ ŽHAVENÍ PRO SOUBOR SVÍTIDEL 1÷12 PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	102
OBRÁZEK 4.28: POMĚR ODPORU R_H/R_C PRO V ZÁVISLOSTI NA CELKOVÉ DOBĚ ŽHAVENÍ PRO SVÍTIDLO 11 , OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	103
OBRÁZEK 4.29: ZÁVISLOST POMĚRU ODPORŮ TEPLÉ A STUDENÉ KATODY R_H/R_C (NA POČÁTKU A NA KONCI STARTU ZÁŘIVKY) NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY KOMPENZACE ÚČINÍKU, VLEVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLA 1÷12 (10×12×5×5 MĚŘENÍ), VPRAVO VÝBĚROVÝ SOUBOR SVÍTIDLO 11 (50×5×5 MĚŘENÍ)	103
OBRÁZEK 4.30: ENERGIE ŽHAVENÍ PRO SOUBOR SVÍTIDEL 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA CELKOVÉ DOBĚ ŽHAVENÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	105
OBRÁZEK 4.31: ENERGIE ŽHAVENÍ PRO SVÍTIDLO 11 V ZÁVISLOSTI NA CELKOVÉ DOBĚ ŽHAVENÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	105
OBRÁZEK 4.32: INTENZITA OSVĚTLENÍ PRO SOUBOR SVÍTIDEL 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA CELKOVÉ ENERGII ŽHAVENÍ OBOU VLÁKEN PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	106
OBRÁZEK 4.33: INTENZITA OSVĚTLENÍ PRO SVÍTIDLO 11 V ZÁVISLOSTI NA CELKOVÉ ENERGII ŽHAVENÍ OBOU VLÁKEN PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	107
OBRÁZEK 4.34: ČETNOST DOBY TRVÁNÍ STAVU „SVÍCENÍ“ BĚHEM 12× 10 STARTŮ SVÍTIDEL 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2.....	108
OBRÁZEK 4.35: ČETNOST DOBY TRVÁNÍ STAVU „SVÍCENÍ“ BĚHEM JEDNOHO STARTU SVÍTIDLA 11 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	109
OBRÁZEK 4.36: ČETNOST CELKOVÉ DOBY STARTU ZÁŘIVKY BĚHEM 12×10 STARTŮ SVÍTIDEL 1÷12 V ZÁVISLOSTI NA	

NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	110
OBRÁZEK 4.37: ČETNOST DOBY STARTU ZÁŘIVKY BĚHEM JEDNOHO STARTU SVÍTIDLA 11 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1 A L2	111
OBRÁZEK 4.38: ČETNOST DOBY STARTU ZÁŘIVKY BĚHEM JEDNOHO STARTU SVÍTIDLA 11÷12 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1, 2×10 MĚŘENÍ, PŮVODNÍ MĚŘENÍ Z ROKU 2006 [Nov06].....	112
OBRÁZEK 4.39: ČETNOST DOBY ŽHAVENÍ VLÁKEN ZÁŘIVKY BĚHEM JEDNOHO STARTU SVÍTIDLA 11÷12 V ZÁVISLOSTI NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO OBA TYPY KOMPENZACE ÚČINÍKU S TLUMIVKOU L1, 2×10 MĚŘENÍ, PŮVODNÍ MĚŘENÍ Z ROKU 2006 [Nov06]	112
OBRÁZEK 5.1: MĚŘENÍ PROUDŮ A NAPĚTÍ BĚHEM STARTOVACÍHO PROCESU ZÁŘIVKY S ELEKTRONICKÝM PŘEDŘADNÍKEM ..	114
OBRÁZEK 5.2: OSCIOGRAM NAPĚTÍ A PROUDU PŘI STARTOVACÍM PROCESU ZÁŘIVKY S ELEKTRONICKÝM PŘEDŘADNÍKEM..	116
OBRÁZEK 8.1: NÁHRADNÍ OBVOD SVÍTIDLA S PARALELNÍ KOMPENZACÍ PRO STAV „OHŘEV STARTÉRU“	134
OBRÁZEK 8.2: NÁHRADNÍ OBVOD SVÍTIDLA S PARALELNÍ KOMPENZACÍ PRO STAV „ŽHAVENÍ ZÁŘIVKY“	135
OBRÁZEK 8.3: NÁHRADNÍ OBVOD SVÍTIDLA S PARALELNÍ KOMPENZACÍ PRO STAV „SVÍCENÍ“	135
OBRÁZEK 8.4: NÁHRADNÍ OBVOD PRO STAV „VYPNUTÍ“	136
OBRÁZEK 8.5: NÁHRADNÍ OBVOD SVÍTIDLA SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ PRO STAV „OHŘEV STARTÉRU“	137
OBRÁZEK 8.6: NÁHRADNÍ OBVOD SVÍTIDLA SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ PRO STAV „ŽHAVENÍ ZÁŘIVKY“	137
OBRÁZEK 8.7: NÁHRADNÍ OBVOD SVÍTIDLA SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ PRO STAV „SVÍCENÍ“	138

SEZNAM TABULEK

TABULKA 2.1: STANDARDIZOVANÝ ODPOR KATODY A TESTOVACÍ PROUD PRO HOTOVOU ZÁŘIVKU [DOR02]	28
TABULKA 2.2: POUŽITÍ STARTÉRŮ	36
TABULKA 2.3: SOUHRN ZÁKLADNÍCH VLASTNOSTÍ KOMPENZAČNÍCH KONDENZÁTORŮ MKP POUŽÍVANÝCH PRO ZÁŘIVKOVÁ OSVĚTLENÍ	59
TABULKA 3.1: MĚŘENÍ ODPORU STARTÉRU	65
TABULKA 3.2: MĚŘENÍ INDUKČNOSTI A ODPORU TLUMIVKY	65
TABULKA 3.3: IMPEDANCE SVÍTIDEL V RŮZNÝCH STAVECH	66
TABULKA 4.1: TOPOLOGIE SVÍTIDEL PŘI JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍCH	68
TABULKA 4.2: VELIČINY VYHODNOCOVANÉ V JEDNOTLIVÝCH STAVECH	77
TABULKA 4.3: VÝZNAM GRAFICKÝCH ZNAČEK VYMEZUJÍCÍCH ROZHRANÍ STAVŮ	80
TABULKA 4.4: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY PRO ZÁŘIVKU S PARALELNÍ KOMPENZACÍ ÚČINÍKU (CPL1) A NAPÁJECÍM NAPĚTÍM 230 V, SVÍTIDLO 11, 50 MĚŘENÍ	89
TABULKA 4.5: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY PRO ZÁŘIVKU S PARALELNÍ KOMPENZACÍ ÚČINÍKU (CPL2) A NAPÁJECÍM NAPĚTÍM 230 V, SVÍTIDLO 11, 50 MĚŘENÍ	89
TABULKA 4.6: CELKOVÁ DOBA ŽHAVENÍ PŘIPADAJÍCÍ NA 1 START, PRO ZÁŘIVKU 11, MEDIÁN Z 50 MĚŘENÍ	90
TABULKA 4.7: CELKOVÁ DOBA ŽHAVENÍ PŘIPADAJÍCÍ NA 1 START, PRO SADU SVÍTIDEL 1÷12, MEDIÁNY Z 10×12 MĚŘENÍ	90
TABULKA 4.8: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY PRO ZÁŘIVKU SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ ÚČINÍKU (CSL1) A NAPÁJECÍM NAPĚTÍM 230 V, SVÍTIDLO 11, 50 MĚŘENÍ	92
TABULKA 4.9: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY PRO ZÁŘIVKU SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ ÚČINÍKU (CSL2) A NAPÁJECÍM NAPĚTÍM 230 V, SVÍTIDLO 11, 50 MĚŘENÍ	92
TABULKA 4.10: OZNAČENÍ MĚŘENÝCH ZAPOJENÍ	95
TABULKA 5.1: VÝSLEDNÉ HODNOTY JEDNOTLIVÝCH VELIČIN DEFINUJÍCÍCH START ZÁŘIVKY S ELEKTRONICKÝM PŘEDŘADNÍKEM	115
TABULKA 8.1: PARAMETRY KONDENZÁTORU S PARALELNÍ KOMPENZACÍ	129
TABULKA 8.2: PARAMETRY KONDENZÁTORU SE SÉRIOVOU KOMPENZACÍ	129
TABULKA 8.3: PARAMETRY TLUMIVKY, VLÁKEN, STARTÉRU A TRUBICE VE STAVU „OHŘEV STARTÉRU“ - PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU	130
TABULKA 8.4: PARAMETRY TLUMIVKY, VLÁKEN A TRUBICE VE STAVU „ŽHAVENÍ“ - PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU	131
TABULKA 8.5: PARAMETRY TLUMIVKY A TRUBICE VE STAVU „SVÍCENÍ“ - PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU	132
TABULKA 8.6: OZNAČENÍ STAVŮ	139
TABULKA 8.7: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY, PRŮMĚR 1. ZÁŘIVKY (11. ZÁŘIVKA, 50×5 MĚŘENÍ)	139
TABULKA 8.8: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY, PRŮMĚR JEDNÉ ZÁŘIVKY (12. ZÁŘIVKA, 50×5 MĚŘENÍ)	140
TABULKA 8.9: ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI STAVY, PRŮMĚR 12. ZÁŘIVEK (ZÁŘIVKA 1÷12, 12×10×5 MĚŘENÍ)	140
TABULKA 8.10: HODNOTY ZÍSKANÉ KANÁLEM 1 PRO CELÝ ŽHAVÍCÍ PROCES STARTOVÁNÍ ZÁŘIVKY	141
TABULKA 8.11: HODNOTY ZÍSKANÉ KANÁLEM 2 PRO CELÝ ŽHAVÍCÍ PROCES STARTOVÁNÍ ZÁŘIVKY	141

1 Úvod

Umělé světelné zdroje doplňují přirozené sluneční světlo a pomáhají vytvářet světelné podmínky v různých obytných i venkovních prostorech. Světlo motivuje člověka k práci, vyvolává slavnostní náladu, pocit bezpečí nebo naopak utlumuje pracovní výkonnost a uspává. Dobré osvětlení je tedy pro každého z nás životně důležité. Správný návrh osvětlení a výběr světelného zdroje je mezioborová disciplína vyžadující často složité kompromisy.

Umělé osvětlení přitom celosvětově spotřebovává 2 000 TWh elektrické energie ročně, což činí 10÷15 % celosvětové produkce [Ric03]. Důsledkem je roční produkce jednoho bilionu tun CO₂ a produkce 40 000 tun odpadu kontaminovaného rtuť. Každodenně na světě svítí 30 biliónů světelných zdrojů a ročně se vyrobí 10 biliónů nových zdrojů za téměř 50 miliard eur [ČTK10].

Výbojové zdroje světla celosvětově generují cca 78 % umělého světla, ale jejich podíl na spotřebované energii pro osvětlování činí pouze 17 % [Ric03]. Zářivky – nízkotlaké rtuťové výbojky jsou prioritní volbou v mnoha oblastech použití, protože se vyznačují vysokým měrným výkonem přibližně 100 lm/W a nízkou spotřebou elektrické energie. Příkladem použití jsou rozsáhlé osvětlovací soustavy veřejných interiérů typu administrativních budov, obchodních center, divadel, škol, továren, ale také pouliční, dopravní a nouzové osvětlení. Zavedení kompaktní verze vedlo k masovému využití zářivek v domácnostech. Jinak řečeno, zářivka je doposud nejekonomičtější, nejrozšířenější a v podstatě nejúčinnější zdroj bílého světla s nízkými pořizovacími náklady.

V porovnání se žárovkou spotřebuje zářivka přibližně pětinu elektrické energie. Také z hlediska životnosti jsou zářivky vynikající alternativou, protože průměrná životnost zářivky se pohybuje okolo 20 000 hodin ve srovnání s životností žárovky, která je přibližně 1 000 hodin. Dalšími výhodami jsou jednoduchost a možnost ovlivňovat barevné podání světla prostřednictvím použitého luminoforu. Běžně jsou používány zářivky s barvou odpovídající dennímu světlu, kterého nelze dosáhnout u žárovek, protože by se roztavilo jejich wolframové vlákno.

Zářivky jsou ekologické zdroje. Při hodnocení dopadu na životní prostředí se projeví dlouhá doba života s nízkou spotřebou, která převažuje nad dopady při produkci [Wha02]. Kromě toho se dají recyklovat. Více než 90 % hmotnosti zářivek lze znovu použít při výrobě nových světelných zdrojů. Zbývajících 10 % hmotnosti může najít

využití při výrobě jiných produktů [Lin08].

V současné době patří zářivky stále mezi prioritní světelné zdroje s vysokou účinností, rovnoměrným osvětlením a dlouhou dobou života. V budoucnu zjevně dojde k postupnému ústupu zářivek směrem k LED diodám. LED diody nepodléhají výkonovému omezení Planckova zákona 683 lm/W jako teplotní a výbojové zdroje a předpokládá se, že ho výrazně překonají. Již dnes nejmodernější komerční LED s bílým světlem přesahují účinnost 100 lm/W [LED10]. V roce 2009 tvořil příjem z prodeje LED diod u firmy Philips 6÷8 % z celkového prodeje světelných zdrojů [ČTK10]. Započítáme-li průměrnou cenu LED zdroje s nízkou teplotou chromatičnosti 46 \$ na 1000 lm oproti nákladům na žárovku stejného světelného toku 0,26 \$, je ovšem prodaný objem LED zdrojů zlomkem v řádu jednotek promile celkového počtu prodaných zdrojů.

Zářivky jsou masově využívány od konce 40. let minulého století a jejich technologie je zvládnuta na velmi vysoké úrovni. Díky jejich obrovskému nasazení jsou stále v centru zájmu vědců a vývojářů. Mnoho současných článků popisuje různá technologická vylepšení.

1.1 Současný stav ve výzkumu zářivkového osvětlení

V centru zájmu stále stojí snaha o prodloužení doby života zářivek. Nejvíce pozornosti budí termoemissní vrstva katod. Dřívější práce se zabývaly její optimální tloušťkou a složením. Současné články se soustřeďují na optimální tepelné poměry katod při startech [JiY99], [JiY95], [Ham97], [Wak06], [Bus09], [Tla10] a při stmívání [Res03], [Tet01], které výrazně ovlivňují dobu života zářivky. Řeší se optimální nažhavení během teplého startu [Dor02], zkrácení života při studených startech [Tet97], [Bie02] a optimalizace startu při současném stmívání [Gou02]. Druhým aktuálním tématem je optimalizace dávkování rtuti do trubice [Cor08]. Z ekologických důvodů je snahou přiblížit se fyzikálnímu minimu. Problémem je přesné dávkování při výrobě a pokles obsahu rtuti díky reakci s držáky elektrod a s vrstvou luminoforu.

Dalším klíčovým úkolem je zvyšování účinnosti. Zde hraje klíčovou roli opět katodový úbytek a kvalita termoemissní vrstvy. Z provozně technických důvodů je ovšem nutné nastolit takové standardy, aby zářivkové trubice mohly pracovat s různými předřadníky při zachování hlavních parametrů. Všechny komponenty osvětlovacího tělesa proto podléhají standardizaci. Aktuální vývoj v oblasti osvětlování zářivkami dokládají i nově revidované normy [IEC60081]. Velký potenciál skýtá nízká účinnost

luminoforu <50 %. Slibný se jeví vývoj tzv. dvoukvantových luminoforů, kde jeden UV foton s vysokou energií excituje soli vzácných zemin Ytterbia a Erbua, a ty následně vyzařují dva fotony ve viditelné oblasti [Mah99]. Jiným řešením nízké účinnosti luminoforu je přímé generování světla ve viditelné oblasti pomocí vysoce těkavých molekul [Wha02]. Z posledního desetiletí můžeme vybrat ještě úpravu geometrie trubice kompaktních zářivek, kde nový tvar snižuje ztráty vzájemným si stíněním částí trubice.

Podporu výzkumným oblastem přináší dnes neodmyslitelná oblast počítačového modelování výboje [Ach90], [Car98], [Mad92], [Kop07], nebo jen chování elektrod trubice [Wak07b], či celých obvodů svítidla [Hsi98], [Wak06]. Nejnovějším trendem jsou fyzikální modely výboje schopné simulovat i dynamické děje [Zis03].

Samozřejmý je výzkum v oblasti napájení zářivek vyššími frekvencemi prostřednictvím elektronických předřadníků. Řeší se jednak ovlivnění účinnosti a parametrů trubice v závislosti na předžhavení elektrod [Wak07a], tak i samozřejmě konstrukce předřadníků [Mad96], [Sha06]. Největších úspor, až 75 %, dosahují elektronické stmívatelné předřadníky vybavené senzory okolního osvětlení [Tam03], [Kli03]. Důležitým aspektem při stmívání je ovlivnění doby života zářivky přímo související s optimalizací teploty katod během celého provozu.

Podíl elektronických předřadníků na trhu mírně přesahuje 50 % [Amp08]. Elektronické předřadníky jsou, a vždy budou, díky vyšší složitosti mírně dražší. Přestože dosahují vyšší účinnosti a lze snadno spočítat ekonomickou návratnost takové investice, dává řada investorů stále přednost předřadníkům elektromagnetickým. Důvodem mohou být ovšem další rozdílné vlastnosti. Elektromagnetický předřadník je robustnější – lépe odolává přepětím v napájecí síti i vyšším teplotám v osvětlovacích tělesech a má proto vyšší spolehlivost i dobu života.

1.2 Cíl disertační práce

Práce je zaměřena na měření a detailní analýzu startů zářivkových svítidel s elektromagnetickým předřadníkem. Zapálení výboje je komplikovaný proces, kterého se aktivně účastní všechny komponenty svítidla. To skýtá jedinečnou možnost pro jejich posuzování a diagnostiku. Zároveň, start zásadním způsobem ovlivňuje dobu života zářivky. Lze očekávat, že studium poměrů při startu přinese doporučení, která zapojení jsou vhodnější. Vzhledem ke stále masovému nasazení zářivkového osvětlení s elektromagnetickými předřadníky očekáváme přímé ekonomické důsledky. Pro porovnání budou provedena měření i na elektronickém předřadníku.

Teoretický rozbor si klade za cíl popsat všechny části svítidla s ohledem na jejich účast při startu zářivky. Popis se zaměří na aspekty ovlivňující dobu života jednotlivých komponent a mechanismy vzniku jejich poruch.

V experimentální části budou opakovaně měřeny starty zářivkových svítidel, a to ve dvou základních zapojeních používaných v evropském regionu, tj. s paralelní kompenzací účiníku a v tzv. duo zapojení – čili se sériovou kompenzací účiníku. Dle [Div08] se v České republice využívá především kompenzace paralelní, naopak v některých zemích, například Beneluxu, se z normativních důvodů uplatňuje kompenzace sériová.

Měření bude prostřednictvím měřicí ústředny zaznamenáno ve formě vícekanálových oscilogramů, které se následně zpracují off-line na počítači. Realizace měření proběhne opakovaně se dvěma typy výběrových souborů: a) jedna trubice, b) sada více trubic. Tento systém měření umožní sledovat vzájemné rozdíly parametrů komponent svítidel mezi sebou a zároveň určit na jedné z trubic hodnoty přesně.

Vyhodnocení se zaměří na rozdíly startů s DUO versus s paralelní kompenzací účiníku. Dále bude studován vliv typu tlumivky na proces startu. K dispozici jsou tlumivky s energetickou třídou C, které podle evropské směrnice 2000/55/EC nemohou být od roku 2005 montovány do nových instalací [EU05], a tlumivky s nízkými ztrátami v energetické třídě B.

1.3 Struktura práce

Disertační práce má obvyklou strukturu. V úvodu je nastíněna motivace a stručně uveden přehled současného stavu ve výzkumu zářivkového osvětlování. Vytyčeny jsou cíle práce a základy metodiky.

Kapitola 2 obsahuje teoretickou část, která popisuje jednotlivé komponenty zářivkového tělesa: zářivkovou trubici, tlumivku jako elektromagnetický předřadník, startér a kompenzační kondenzátor.

V Kapitole 3 jsou analyticky řešeny náhradní obvody svítidla v jednotlivých fázích startu: ohřev doutnavkového startéru, žhavení zářivkové trubice, svícení. Zde jsou uvedeny i výsledky jednoduchých měření základních parametrů komponent, nutných pro řešení náhradních obvodů.

Kapitola 4 popisuje vlastní provedení měření startovacího procesu, sestavení programu pro automatické vyhodnocení oscilogramů a následně jsou zde rozebrány dosažené výsledky.

V následující kapitole 5 je popsáno měření poměrů při startu elektronického předřadníku. Zde budou sledovány jen hlavní parametry startu, jako je celková energie při žhavení elektrod zářivky.

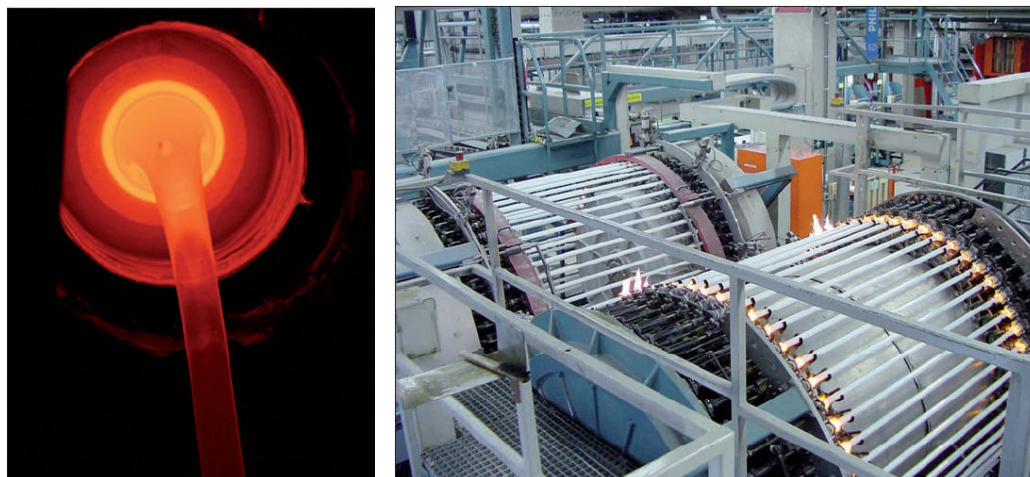
Konečně práce standardně končí shrnutím, uvedeném v závěru.

2 Zářivka jako světelný zdroj

2.1 Oblasti využití zářivek a jejich výroba

Využití zářivek je velmi široké. Kromě běžné zářivky, využívané především k účinnému osvětlení, existují samozřejmě velmi speciální typy, kterých lze dosáhnout různou volbou luminoforu a náplně zářivkové trubice. Jde například o zářivky germicidní, používané pro ničení mikroorganismů, bakterií, plísní, kvasinek a virů, nebo o zářivky erytermální pro použití v soláriích, popř. o zářivky s „černým světlem“ (UV záření okolo 395 nm) pro buzení fluorescence a luminiscence, např. v testech bankovek či dekoračním a trikovém osvětlení. Se zářivkou je možné se setkat i v reprografii (kopírování, tisk), při různých vyšetřeních, analýzách a různých fotochemických procesech. Všechny zářivky však mají jedno společné, pracují na stejném principu, a to na principu nízkotlakého rtuťového výboje.

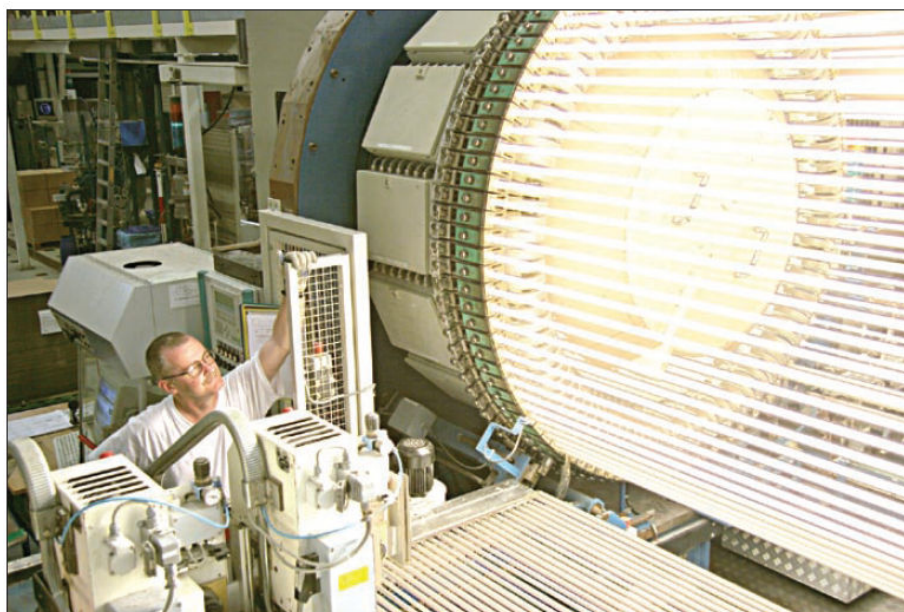
Hlavní část zářivkového tělesa je tvořena skleněnou trubicí naplněnou inertním plynem a opatřenou na obou koncích paticemi s kovovými elektrodami. Skleněná trubice projde nejdříve mycím tunelem, kde je propláchnuta demineralizovanou vodou a poté následuje její vysušení.



Obrázek 2.1: Vlevo proud skla vytékající z tavící pece, vpravo operace zátavu trubice a nožky, čerpání a plnění zářivky [Kot08]

Dalším krokem je nanesení luminiscenční vrstvy, které spočívá v tom, že se prolévá řídká suspenze trubicemi a ulpívající část vytvoří rovnoměrný povlak. Suspenze je tvořena roztokem nitrocelulózy a drobnými částicemi luminoforu. Po dalším usušení je trubice vkládána do pece, kde dojde k vypálení nitrocelulózy, a na stěně trubice zůstanou jen částice luminoforu. K takto připravené trubici se přitaví patky, tj. konce

trubic s elektrodami, opatřené plnicími trubičkami, jimiž se odčerpá z trubic vzduch a vodní páry. Následuje první nažhavení elektrod, při kterém se povlak uhličitánů barya, stroncia a vápníku změní na oxidy. Trubice je dále naplněna přesným množstvím argonu a rtuti a skleněné plnicí trubičky se plamenem zataví a uzavřou. Hotová zářivka se poprvé rozsvítí ve vysokofrekvenčním elektrickém poli a vadné kusy jsou vytrženy automatem, viz obr. 2.2. Pro zajímavost je podrobnější popis výroby zářivek uveden na internetových stránkách, viz [Kot08].



Obrázek 2.2: Zaměstnanec výrobní linky dohlíží na proces testování hotových zářivek [Kot08]

2.2 Prvky zářivkového tělesa

Zářivkové těleso sestává z několika komponentů, z nichž nejzákladnější jsou výbojová trubice, předřadník (startér a stabilizační prvek) a kompenzační kondenzátor. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v následujících kapitolách.

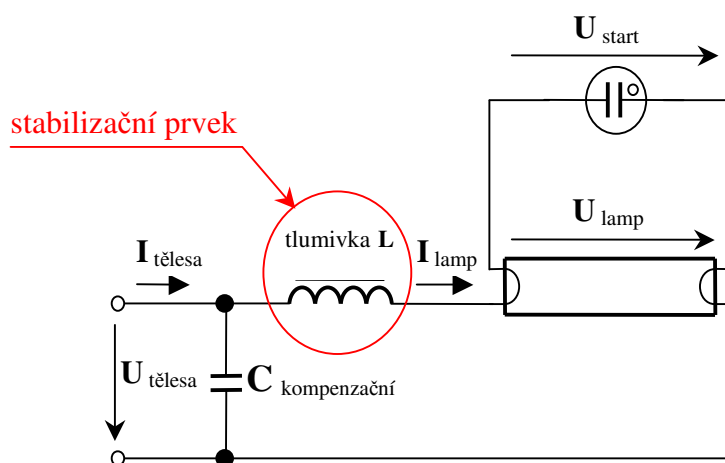
2.3 Předřadník

Definice předřadníku není v odborných literaturách zcela jednotná. Například literatura [App00, str. 115, kapitola 5.3] a [Daš02, str. 27, kapitola E] definuje předřadník jako soubor stabilizačního prvku a startéru. Literatura [Kin64] nazývá předřadníkem pouze stabilizační prvek. V této práci bude předřadník chápán dle popisu v literaturách [App00] a [Daš02], tedy jako sestava stabilizačního prvku a startéru.

2.3.1 Typy předřadníků

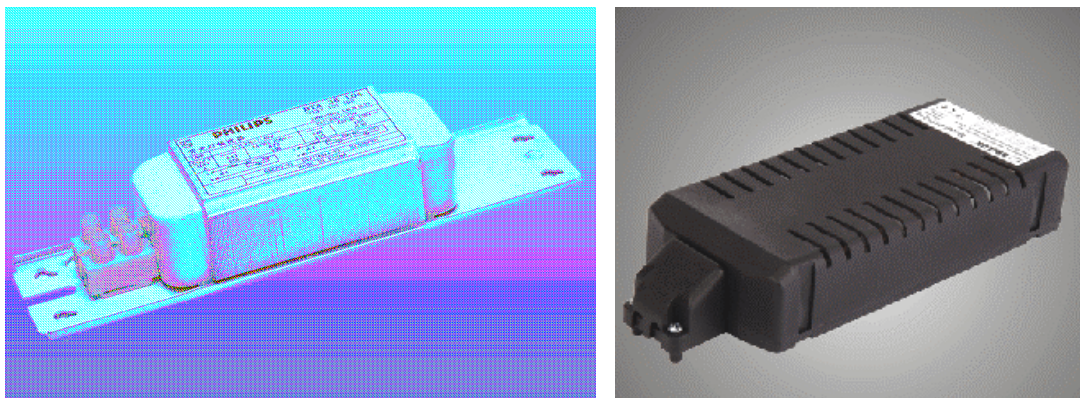
V současné době existují dva základní typy předřadníků, a to klasický indukční předřadník a elektronický předřadník.

Klasický indukční předřadník sestává z tlumivky a startéru. Základní a nejběžnější zapojení zářivkového tělesa s tímto předřadníkem je uvedené na obr. 2.3.



Obrázek 2.3: Schéma zapojení zářivkového tělesa s elektromagnetickým předřadníkem a paralelní kompenzací [Šol05a]

Startér se používá buď doutnavkový, nebo elektronický, přičemž elektronické zamezují opakovanému neúspěšnému startování světelného zdroje na konci jeho životnosti a případně vadnou zářivku odpojí. Dle literatury [Daš02] je v současné době toto technické řešení již překonáno. Problémem tohoto řešení jsou značné energetické ztráty, kdy vlastní spotřeba předřadníku dosahuje přibližně 20 % příkonu světelného zdroje, a velmi nízký induktivní účinník vyžadující kompenzaci buď přímo ve svítidle, nebo společnou pro celý světelný okruh. Zářivka navíc při použití induktivního předřadníku pracuje se síťovou frekvencí, a parametry výboje se tak 100krát za sekundu mění. Světelný tok tyto změny částečně kopíruje a výsledkem je míhání světla, které je sice na hranici vnímatelnosti, nicméně může vyvolávat zvýšenou únavu a nepříjemné pocity. Může se projevit i tzv. stroboskopický efekt. V předřadnících nižší kvality mohou vznikat nežádoucí akustické jevy způsobené chvěním plechů jádra cívky, jejichž frekvence jsou tvořeny násobky základní síťové frekvence a projevují se jako nepříjemné bručení. Příklady klasických indukčních předřadníků jsou uvedeny na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Zleva indukční předřadník řady BTA od firmy Philips, vpravo předřadník řady PLC od firmy Brilux [Sta99]

V posledních letech se rozšířilo použití elektronických stabilizačních a zážehových zařízení, která pracují při vysoké frekvenci a umožňují současně omezení vybíjecího proudu v lampě, její zážeh i zvýšení světelné účinnosti světelného zdroje. Příkladem takového zařízení je elektronický předřadník.

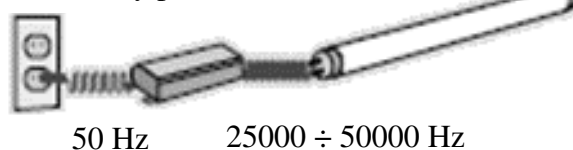
Elektronické předřadníky jsou kompaktní elektronické přístroje, které jsou součástí svítidla a nahrazují soubor konvenčních prvků, tj. tlumivku se startérem a kondenzátorem. Zásadním způsobem se odlišují od indukčních. V mnohem vyšší míře chrání lampy proti vlivu výkyvů napětí a frekvence v napájecí síti. Mohou pracovat na frekvenci 50 a 60 Hz a s napájecím napětím v rozmezí od 200 do 250 V. Stručný souhrn vlastností elektronického předřadníku velmi dobře vystihuje literatura [Daš02]:

“Základní součástí elektronického předřadníku je měnič frekvence, který zvyšuje pracovní frekvenci výboje ze síťové na 25÷50 kHz (viz obr. 2.5).

klasický elektromagnetický předřadník



elektronický předřadník



Obrázek 2.5: Porovnání funkce předřadníků [Daš02]

Výsledkem je jednak možnost podstatného zmenšení rozměrů a hmotnosti předřadníku, jednak podstatné **snížení výkonových ztrát** (přibližně na polovinu), při současném **zvýšení měrného výkonu zářivky** o 10÷15 % (oproti provozu při 50 Hz s klasickým indukčním předřadníkem). **Používání zářivky s elektronickým předřadníkem má** kromě zvýšení energetické účinnosti i **řadu dalších výhod:**

- odstranění míhání světla a stroboskopického efektu
- odstranění zvukových efektů (jsou posunuty nad slyšitelnou oblast)
- prodloužení životnosti zářivek až o 50 %
- odstranění cyklického zapalování na konci životnosti zářivky.

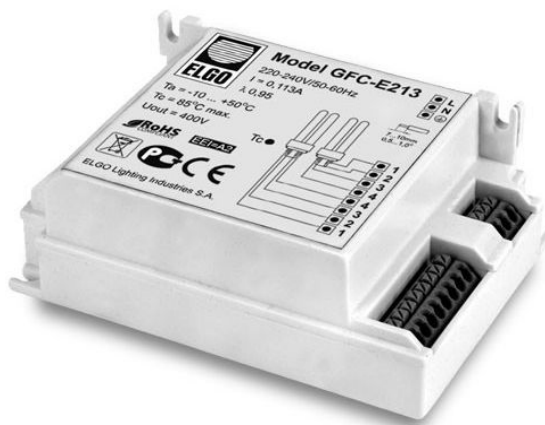
Nevýhodou elektronických předřadníků je obecně nesinusový odebíraný proud, ve kterém jsou obsaženy složky vyšších kmitočtů (násobky základní frekvence 50 Hz). Tyto vyšší harmonické proudy vytvářejí na impedanci napájecí sítě vyšší harmonické napětí, které deformují napěťovou sinusovku. Nejnebezpečnější jsou liché harmonické (zejména třetí), které mohou u rozsáhlejších třífázově zapojených osvětlovacích soustav způsobovat přetížení středního vodiče. Vysoké frekvence vyzařované předřadníkem mohou interferovat se signály ve sdělovacích vedeních a zařízeních. Proto je nutné, aby byl předřadník vybaven dostatečně účinným filtrem, který výše uvedené efekty potlačuje. Všechny předřadníky nesoucí značku ESČ nebo CE musí projít testováním na EMC (elektromagnetickou kompatibilitu) a vyhovět příslušným normám.“

Dle konstrukčního uspořádání se elektronické předřadníky dělí na:

- **externí** určené pro montáž vně svítidla bez dodatečných úprav
- **interní** určené k zabudování uvnitř svítidla
- **integrované**, které jsou neoddělitelnou součástí světelného zdroje.

Zapojení a funkce všech těchto zmíněných typů se principiálně nijak neliší, rozdíl je pouze v mechanismu předžhavování elektrod a v ochranných obvodech, které reagují na poruchové stavy světelného zdroje a omezují zpětné vlivy na napájecí síť. Příklad elektronického předřadníku ukazuje obr. 2.6.

Elektronické předřadníky mohou kromě střídavého proudu fungovat i na stejnosměrný proud a díky tomu lze zářivky napájet z baterií nebo akumulátorů. Tato vlastnost nachází velké využití v systémech bezpečnostního osvětlení.



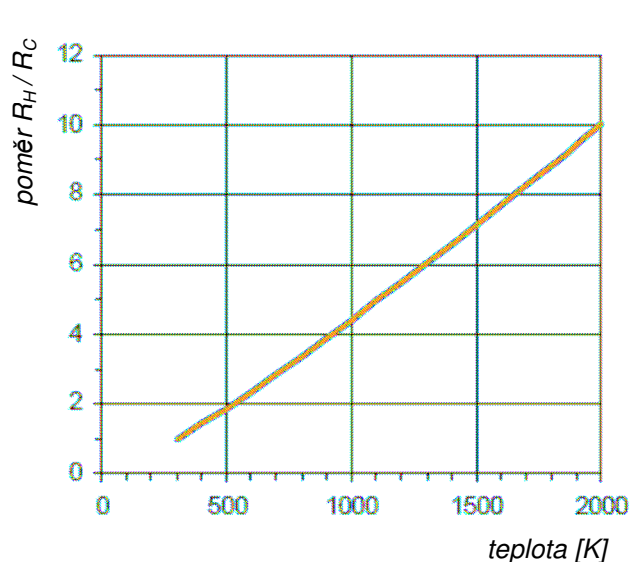
Obrázek 2.6: Elektronický předřadník řady GFC od firmy ELGO [Sta99]

Přes veškeré výhody elektronických předřadníků jsou bohužel náklady na jejich pořízení vyšší než na pořízení předřadníku konvenčního, i když lze v posledních letech pozorovat stále snižování jejich ceny, zvláště, vezmeme-li v úvahu, že u konvenčního předřadníku je nutné navíc zakoupit samostatný startér.

2.3.2 Standardizace statického odporu a energie potřebná pro předžhavení elektrod zářivky

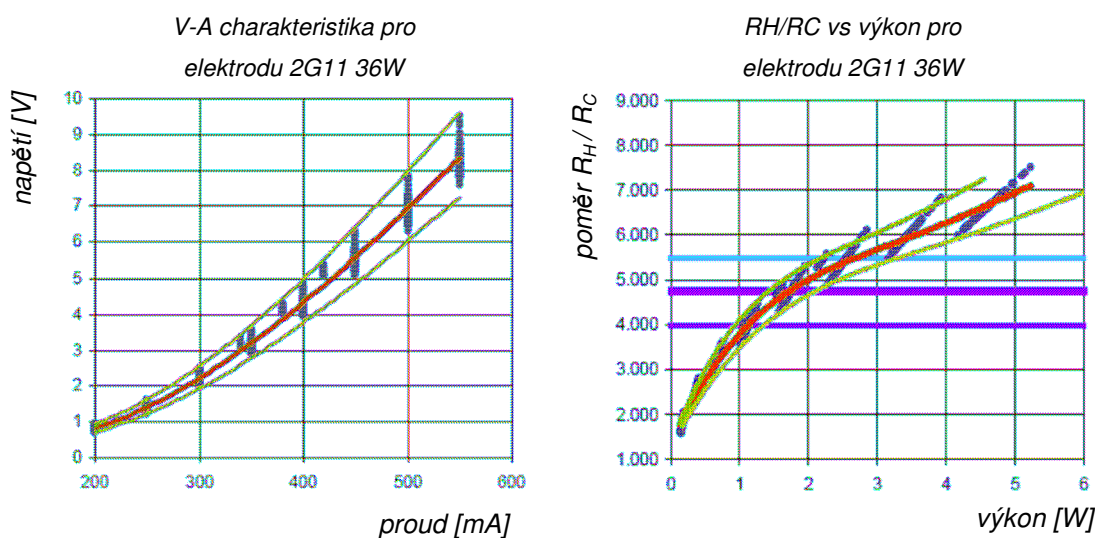
S přechodem od tradičních předřadníků zářivek k elektronickým, bylo výrobcům elektronických předřadníků požadováno více elektrických parametrů pro lepší standardizaci zářivek související se zvýšením účinnosti, možnosti stmívání a delší životností. Protože právě delší životnost výrazně závisí na řádném předžhavení elektrod zářivky ještě před samotným zapálením výboje, byla standardizace elektrických parametrů zaměřena na tuto problematiku, tj. na předžhavení elektrod zářivky.

Tyto wolframové elektrody jsou zataveny na každém konci výbojové trubice, viz popis v kapitole 2.4, na kterých je nanášena emisní hmota na bázi oxidů barya, vápníku, stroncia a popř. dalších aditiv, přičemž relativní množství těchto oxidů se může měnit dle výrobce a typu zářivky. Elektrody zářivky se žhaví na teplotu, při které jsou schopny emitovat elektrony. Tato teplota u všech elektrod přesahuje hodnotu 900 K. Využitím teorému o teplotní závislosti odporu lze tuto teplotu odvodit z poměru odporů wolframového vinutí R_H / R_C , kde R_H představuje odpor wolframového vinutí (vlákna) při zvýšené teplotě a R_C představuje odpor vlákna při pokojové teplotě. K emisi elektronů dochází, navýší-li se odpor R_C alespoň o 4násobek, tj. $R_H / R_C \geq 4$, viz obr. 2.7.



Obrázek 2.7: Závislost poměru odporů R_H/R_C na teplotě wolframového vlákna [Dor02]

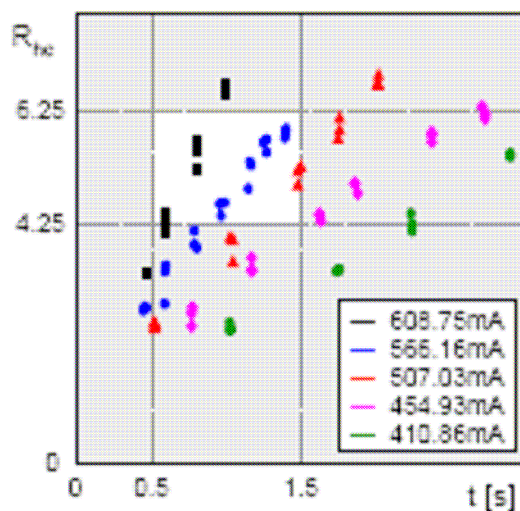
Příslušná teplota je určena voltampérovou charakteristikou katody. Typický příklad je uveden v literatuře [Dor02], viz obr. 2.8a.



Obrázek 2.8: a) voltampérová charakteristika katody pro 2G11 36 W, b) závislost poměru odporů na výkonu pro katodu 2G11 36 W [Dor02]

Na tomto obrázku je vyjádřen vztah mezi napětím a proudem katody s označením 2G11 36 W, přičemž měření byla provedena na hotové zářivce, při pokojové teplotě, za statických podmínek a bez výboje na zářivce. Horní a dolní meze jsou předepsány výrobcem.

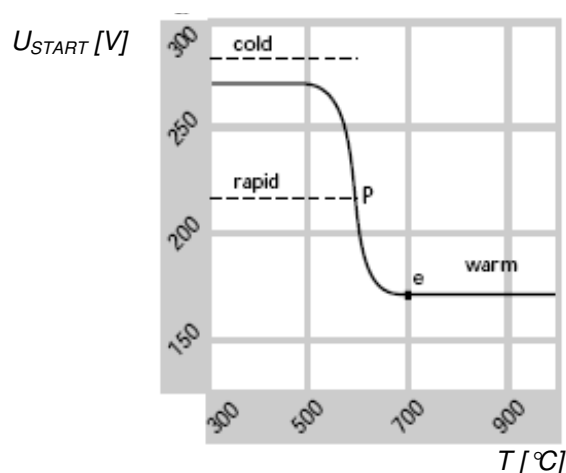
Uvedenou závislost lze jednoduše přepočítat na závislost mezi poměrem odporů R_H / R_C a energetickými ztrátami na katodě, viz obr. 2.8b. Křivka udává výkon, který je potřebný k zachování určité teploty na katodě, tzn., že při teplotě elektrody pod hodnotou $R_H / R_C \approx 4$, není zajištěno správné předžhavení a dochází ke zkrácení životnosti. Při teplotách nad hodnotou $R_H / R_C > 5,5$, dochází naopak k nadměrnému vypařování emisní hmoty, které vede ke zčernání konců zářivky. Dle [Wak06], [Wak07a] jsou tyto meze o něco rozdílnější, nabývají hodnot 4,25 (odpovídá cca 700 °C) a 6,25 (odpovídá 1000 °C). Tato literatura se zároveň, prostřednictvím normy ANSI C 82.11 – 1993, odkazuje na doporučený čas pro předžhavení elektrod, přičemž časový interval nesmí být kratší než 500 ms. Horní hranice sice není stanovena, ale je zřejmé, že čas nesmí být příliš dlouhý, např. delší než 2 s, protože zpoždění mezi zapnutím zářivky a jejím zapálením by mohlo způsobit její špatnou funkci nebo selhání. Předpokládá se proto, že časový interval, přijatelný pro většinu aplikací, bude v rozmezí 500 ms a 1,5 s. Tím je dána doporučená provozní oblast pro předžhavení, která je vyznačena na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9: Pracovní oblast doporučená pro předžhavení [Wak06]

I v [App00] je uvedeno, že minimální teplota zahřátí elektrod, při které dochází k emisi elektronů, je 700 °C. Tato hodnota je vyznačena v grafu na obr. 2.10 písmenem „e“ na tzv. Z – křivce, která je funkční závislostí startovacího napětí na teplotě elektrod.

Aby nedošlo k překročení obou zmíněných mezí, je třeba elektrody standardizovat pro určitý teplotní rozsah a poměr odporů, který je v uvedeném případě $R_H / R_C = 4,75$ (viz obr. 2.8b).



Obrázek 2.10: Napětí startu U_{start} jako funkce teploty elektrody, kde bod “e” značí teplotu, při které dochází k emisi elektronů [App00]

Příklady těchto standardů dle IEC 60901 uvádí následující tabulka 2.1, kde sloupec „Test current“ znamená proud, při kterém se poměr odporů pohybuje v rozsahu $4,75 \pm 0,5$.

Tabulka 2.1: Standardizovaný odpor katody a testovací proud pro hotovou zářivku [Dor02]

Cap	Watt (W)	Sheet no 901-IEC-	Test current (A)	Hot resistance of each cathode (Ω)		
				Rated	Min	Max
2G7	5	2005	0.130	50	37.5	62.5
	7	2007	0.130	50	37.5	62.5
	9	2009	0.130	50	37.5	62.5
	11	2011	0.130	50	37.5	62.5
2G11	18	2218	0.340	12	9	15
	24	2224	0.340	12	9	15
	36	2236	0.385	11	8.2	13.8
	40	6240	0.340	12	9	15
	55	6255	0.500	8	6	10
G24q	10	2510	0.140	50	37.5	62.5
	13	2513	0.140	50	37.5	62.5
	18	2518	0.190	26	19.5	32.5
	26	2516	0.310	13	9.7	16.3
2G10	18	3118	0.340	12	9	15
	24	3124	0.340	12	9	15
	36	3136	0.385	11	8.2	13.8
GX24q	13	3413	0.140	50	37.5	62.5
	18	3418	0.190	26	19.5	32.5
	26	3426	0.310	13	9.7	16.3
	32	7432	0.310	13	9.7	16.3
	42	7442	0.310	13	9.7	16.3

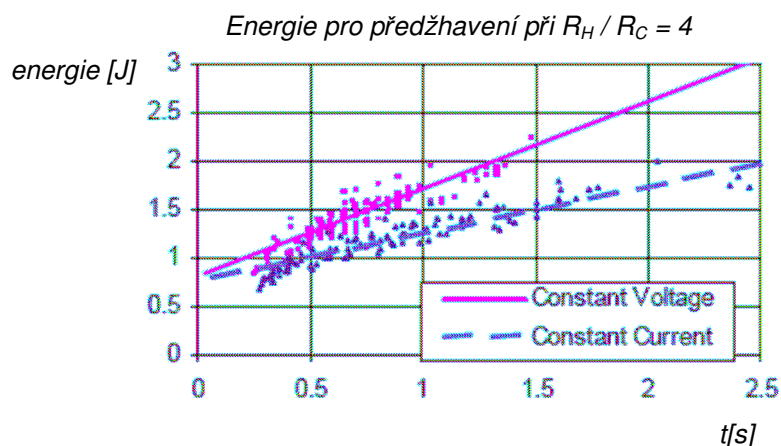
Místo uváděného poměru odporů, dle [Dor02], zkoumali vědci Myojo a Okuno množství energie potřebné pro správné předžhavení elektrod, kde parametrem bylo napětí na zářivce. Čas potřebný na předžhavení elektrod byl omezen na interval $0,4 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$. Dle [Dor02] by měla, v časech pod 0,4 s, teplota záviset na kvalitě emisní vrstvy elektrody. To znamená, že v místech, kde bude chybět emisní hmota, bude mít teplota strmější průběh na rozdíl od míst emisní vrstvou pokrytých. Dodávka teploty pak nebude homogenní. Čas delší než 3 s nebyl uvažován, protože elektronické předřadníky s takto dlouhými předžhavovacími časy se na trhu nevyskytují.

Měření energie bylo prováděno na několika rozdílných elektrodách CFL zářivek při poměru $R_H / R_C = 4$ v různých časech pro předžhavení. Příklad je uveden na obrázku 2.11. Ten vyjadřuje závislost energie potřebné pro předžhavení elektrod na čase pro PL - C 26 W zářivku. Jsou zde uvedeny oba způsoby předžhavení, tj. evropský způsob, kde jsou elektrody přehřívány konstantním proudem

$$P(t) = I^2 \cdot R_{\text{elektrod}}(t), \quad (2.1)$$

a americký způsob, kde je energie pro předžhavení elektrod dodávána prostřednictvím konstantního napěťového zdroje, tj.

$$P(t) = U^2 / R_{\text{elektrod}}(t). \quad (2.2)$$



Obrázek 2.11: Energie pro předžhavení CLF zářivek, konkrétně pro PL - C 26 W [Dor02]

Uvedenou lineární závislost lze vyjádřit vztahem

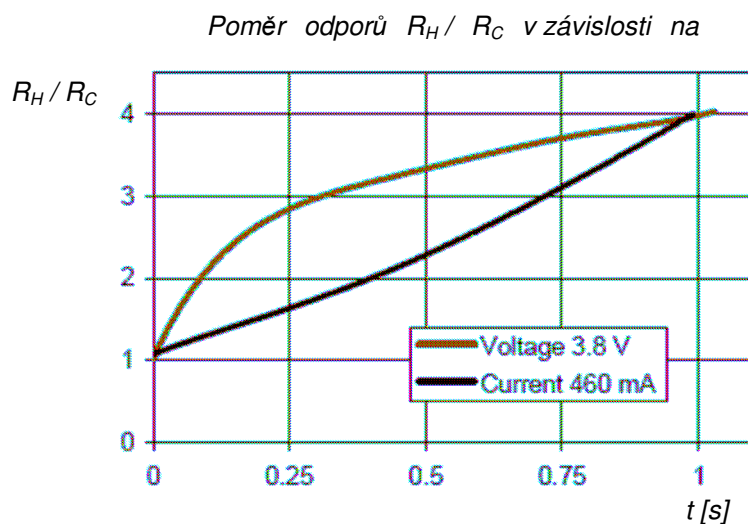
$$E(t) = Q_{\text{elektrody}} + P_{\text{ztrát}} \cdot t. \quad (2.3)$$

Z obrázku je patrné, že v čase $t = 0$ se oba lineární průběhy protnou. Hodnota $Q_{\text{elektrody}}$ vyjadřuje teplo obsažené na elektrodě a lze ji určit vztahem

$$Q_{\text{elektrody}} = C \cdot \Delta T, \quad (2.4)$$

kde C je tepelná kapacita wolframového vlákna elektrody v $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$; $C = m \cdot c$
 ΔT je rozdíl teplot korespondující s odporem vlákna za studena R_C a po ohřátí R_H .

Spád obou průběhů lze vysvětlit energetickými ztrátami při předžhavení. Spády obou průběhů jsou rozdílné, přičemž spád u předžhavení zajišťovaném konstantním napětím je vždy vyšší než které je zajišťované proudem. Tuto skutečnost je možné objasnit grafem na obrázku 2.12, na kterém je znázorněna závislost poměru odporů na čase potřebném pro přezhavení buď s konstantním proudem, nebo s konstantním napětím.



Obrázek 2.12: Navýšení poměru odporů R_H / R_C u PL-C 26 W elektrody v závislosti na čase; při žhavení s konstantním proudem 460 mA nebo s konstantním napětím 3,8 V [Dor02]

Spád křivky pro předžhavení s konstantním napětím se nejprve strmě zvyšuje a po delším čase rapidně klesá. Od té doby je poměr odporů R_H / R_C ve vztahu k teplotě na elektrodě lineární. Křivka tak zároveň vyjadřuje vývoj teploty na elektrodě. Počáteční strmost je dána vztahem pro vstupní výkon (2.2). Na počátku je odpor $R(t)$ při pokojové

teplotě malý, což má za následek vysokou hodnotu výkonu a rychlý nárůst teploty. Během předžhavení se odpor zvyšuje s činitelem 4, a proto má křivka na konci malou strmost.

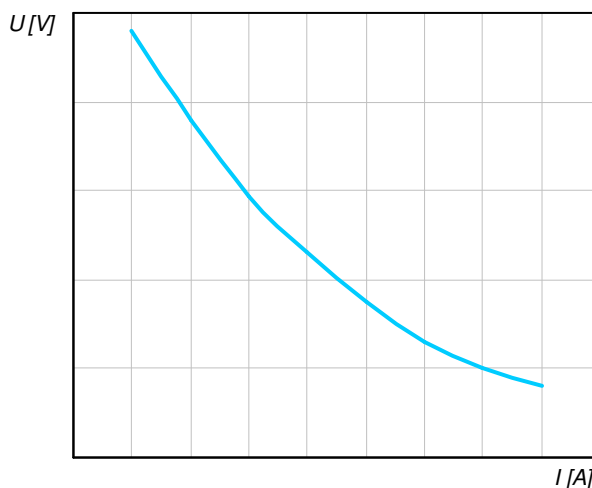
Pro předžhavení zajišťované konstantním proudem je situace odlišná. Zde platí vztah (2.1). Na počátku je odpor nízký, tím je malý i vstupní výkon a dochází k pozvolnému nárůstu teploty. Jak odpor vzroste, zvýší se tak i výkon a také teplota elektrody.

Důsledkem tedy je, že pro žhavicí obvod řízený napětím je průměrná teplota během periody předžhavení vyšší než pro žhavicí obvod řízený proudem. Vyšší průměrná teplota během periody pro předžhavení znamená vyšší tepelné ztráty.

2.3.3 Nutnost použití předřadníku u zářivek

Optimální funkce zářivek je dána převážně vlastnostmi použitého předřadníku, který sestává ze stabilizačního prvku a startéru. Stabilizačním prvkem může být rezistor, tlumivka nebo kondenzátor, popř. jejich kombinace. V některých případech se používá i transformátor.

Podobně jako všechny výbojové zdroje, mají i zářivky negativní (zápornou) voltampérovou charakteristiku, dle které odpor výboje klesá s rostoucím proudem, viz obr. 2.13.



Obrázek 2.13: Statická voltampérová charakteristika výbojového zdroje [App00].

To je také důvodem, proč nelze tyto zdroje připojovat přímo k elektrické síti, ale pouze do série se zařízením omezujícím jejich pracovní proud na jmenovitou hodnotu,

která je specifická pro jednotlivý typ výbojového zdroje. Zařízením, které omezuje proud na jmenovitou hodnotu, je zmíněný předřadník.

2.3.4 Hlavní funkce předřadníku

Kromě jedné z nejdůležitějších funkcí předřadníku, jíž je omezovat a stabilizovat elektrický proud procházející výbojovou trubicí na jmenovitou hodnotu, vykonává předřadník řadu dalších funkcí:

- zajišťuje, že zářivka pokračuje v činnosti i v případě průchodu proudu nulou, jež nastává dvakrát během jednoho frekvenčního cyklu, periody; napájecí napětí i proud lampy jsou sinusové o frekvenci 50 nebo 60 Hz a v momentě nulového napětí proud reverzuje (prochází nulou);
- poskytuje zápalné napětí pro počáteční start zářivky, které je vyšší než napětí provozní. Výše zápalného napětí závisí na druhu, tlaku a teplotě plynu, na tvaru a velikosti elektrod a na rozměrech výbojové trubice. Zápalné napětí roste s délkou trubice a se zmenšujícím se jejím průřezem;
- zajišťuje ohřev elektrod zářivky během zápalného procesu a v některých případech také během normálního provozu. V prvním případě se jedná o tzv. předřadník s teplým startem, ve druhém o tzv. regulační/stmívatelný předřadník.

Vedle těchto základních funkcí musí předřadník splňovat další, neméně důležité požadavky, kterými jsou zajištění dostatečně vysokého účinníku (Power Factor), omezení harmonického zkreslení síťového proudu, a v možném případě poskytnutí vysoké impedance pro frekvence používané ke spínacím účelům v automaticky frekvenčně regulačních obvodech venkovních aplikací. Předřadník dále musí poskytnout dostatečné potlačení elektromagnetického rušení, které může být produkováno zářivkou nebo předřadníkem a mohlo by rušit jiná elektrická zařízení. Omezuje zároveň zkratové proudy, popř. proudy během rozběhu zářivky, čímž chrání elektrody před přetížením, a v souladu s technickými podmínkami omezuje napětí, proud a výkon zářivky po dobu kolísání síťového napětí. Pro vysokofrekvenční předřadníky navíc platí, že odpojí zářivku v případě, nemůže-li být zapálena běžným způsobem.

Poslední skupinou požadavků pro předřadníky nejen v oblasti průmyslové, ale i v oblasti uživatelské, jsou malé rozměry, dlouhá životnost, odolnost vůči teplotám vyskytujícím se v osvětlovacích tělesech, nízké ztráty a nízká úroveň hluku.

2.4 Způsoby zapálení výboje

Pro zapálení výboje se používají tři základní způsoby. Jsou jimi start prostřednictvím doutnavkového zapalovače, studený start a teplý start. Popis jejich vlastností následuje:

- Start prostřednictvím doutnavkového zapalovače

po zapálení doutnavého výboje dojde k zahřátí a spojení bimetalových elektrod startéru. Jakmile výboj zhasne, začne elektrodami zářivky procházet zkratový proud tlumivky, čímž se elektrody zářivky žhaví na teplotu, při které jsou schopny emitovat elektrony. Současně dochází k ochlazování elektrod startéru, které má za následek jejich rozpojení. Rozpojením obvodu se na tlumivce naindukuje napětí, které umožní společně s napájecím napětím rozsvícení zářivky. Pokud zářivka nezapálí, celý proces se opakuje. Výsledkem bývá několikeré bliknutí při startu, které zkracuje životnost zářivky.

- Studený start

je v podstatě metoda zapálení výboje bez zpoždění nebo blikání. Start je zajišťován prostřednictvím elektronického předřadníku určeného pro studený start. Tento předřadník namísto přehřívání elektrod posílá na zářivku napěťový impuls $> 1\text{kV}$, který vyvolá zapálení výboje i mezi studenými elektrodami. Vzhledem k tomu, že tyto předřadníky nedodávají elektrodám žhavicí proud před ani po zapálení výboje, mají ze všech předřadníků nejnižší energetické ztráty. Start bez přehřátých elektrod však vede k rychlejší degradaci jejich emisní vrstvy, což má za následek zkracování životnosti zářivek při častém startování. Z tohoto důvodu je použití těchto předřadníků výhodnější pouze tam, kde jsou intervaly mezi svícením a vypnutím/zapnutím delší. V porovnání s teplým startem je například při provozu v tříhodinovém cyklu životnost zářivky zkrácena přibližně o čtvrtinu.

- Teplý start

k tomuto startu se rovněž používá elektronický předřadník. Tyto předřadníky s teplým startem jsou za účelem prodloužení životnosti zářivek určeny pro intervaly s častým zapínáním. V předřadnících je integrován obvod zajišťující před zapálením výboje ohřev elektrod po dobu 1 až 2 vteřin. Zapálení zářivky je tak mírně zpožděno, ale nedochází k nežádoucímu poblikávání. V některých

případech je tímto předřadníkem dodáván žhavicí proud i po zapálení výboje. Jedná se v podstatě o dodávku dodatečného příkonu na zářivku, jehož velikost se pohybuje okolo $1,5 \div 2$ W. Nadstavbou teplého startu je takzvaný programovaný start, jehož prostřednictvím je možno prodloužit životnost zářivky až o 50 %, ve srovnání s indukčním předřadníkem.

2.4.1 Startér

Startér je zařízení, které zajišťuje vstupní zahřátí elektrod fluorescenční lampy před samotným zážehem výboje. Rozmezí teplot doporučené pro zahřátí elektrod je, dle [Wak06], $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, viz kapitola 2.3.2. Po zahřátí elektrod vyvolá startér rychlé otevření obvodu, čímž se indukuje nárůst napětí na tlumivce, v jehož důsledku se zapálí výboj uvnitř trubice a dojde k rozsvícení lampy.

Nejjednodušším a nejčastěji používaným zařízením tohoto typu je doutnavkový startér, který obsahuje jeden pár bimetalových elektrod, nebo jednu pevnou a druhou z bimetalu. Tyto elektrody se za studena nedotýkají a jsou umístěny ve skleněné baňce startéru, jež je naplněna inertním plynem, většinou neonem, viz obr. 2.14.



Obrázek 2.14: Doutnavkový startér s bimetalovými elektrodami a odrušovacím kondenzátorem (cca 5 nF), který omezuje rušení (interferenci) zářivky a zlepšuje zapalovací podmínky [Tko02]

Po připojení síťového napětí $230\text{ V} / 50\text{ Hz}$, které všeobecně při studených elektrodách nestačí k zapálení výboje, začne plynem v baňce startéru procházet proud a dojde k doutnavému výboji mezi elektrodami. Elektrody se tímto výbojem zahřejí a v důsledku toho se začnou ohýbat až do chvíle sepnutí, kdy se uzavře obvod, v němž se nacházejí elektrody zářivky. Uzavřeným obvodem začne přes tlumivku, elektrody zářivky a startér procházet zkratový proud, který způsobí rozžhavení elektrod zářivky.

Zkratový proud bývá zhruba o 50 % větší než jmenovitý proud zářivky. Žhavením emitované elektrony vytvoří kolem elektrod zářivky značnou ionizaci plynů. Sepnutím kontaktů startéru přestane hořet doutnavý výboj, čímž dojde k jejich ochlazení a rozpojení. V momentě rozpojení a tedy opětovného otevření obvodu se naindukují napětí ve vinutí tlumivky U_{ST} , které společně v součtu se síťovým napětím, případně s napětím na kondenzátoru při sériové kompenzaci účinníku, umožní zážeh výboje mezi elektrodami fluorescenční lampy. Indukované napětí U_{ST} závisí na indukčnosti tlumivky, velikosti procházejícího proudu uzavřeným obvodem a rychlosti otevření elektrod startéru. Je dáno vztahem

$$U_{ST} = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.5)$$

a jeho velikost se pohybuje okolo 500 V. Je-li součet indukovaného a síťového napětí dostatečný, dochází k zapálení zářivkového výboje. V okamžiku průchodu proudu zářivkou se síťové napětí rozdělí mezi výbojovou trubici U_{LAMP} (cca 110 V) a tlumivku (cca 170 V¹). Protože napětí na trubici U_{LAMP} je menší než napětí výboje doutnavkového startéru, startér znovu nezapálí. V případě, že jsou elektrody zářivky málo nažhavené nebo indukované napětí není dostatečně vysoké, doutnavkový startér celý cyklus opakuje, dokud se zářivka nezapálí. Napětí je dostatečné pouze v případě, nastane-li přerušení proudu ve správném fázovém okamžiku, tj. v době, kdy neprochází střídavý proud v obvodu vláken a tlumivky právě okolím nuly. Po rozsvícení zářivky zůstává na rozevřených elektrodách startéru, který je s ní paralelně spojený, pouze provozní napětí zářivky.

Doutnavkové startéry se všeobecně používají k zážehu lineárních zářivek typu T8 a s ohledem na nízkou cenu jsou neekonomičtější. Mají však podstatnou nevýhodu a tou jsou cyklické pokusy o zážeh poškozené zářivky. To vede k jejímu blikání a stálým nežádoucím akustickým efektům, které pocházejí z jádra tlumivky. Další nevýhodou je, že účinnost těchto startérů může být značně snížena v případě nízkého napětí v napájecí síti nebo při nízké okolní teplotě.

Vysoce kvalitními, spolehlivými a bezpečnými startéry tohoto typu jsou startéry S2 a S10, viz obr. 2.15, s méně než 100 předčasnými selháními na milión produktů.

¹ Součet obou napětí nemusí být 230 V, jedná se o součet vektorový



Startér S10 4-65W SER 220-240V

Startér S2 4-22W SER 220-

Obrázek 2.15: Typy klasických doutnavkových startérů PHILIPS S2, S10 [Sta99]

Uvedené startéry mají dle [Sta99] garantovanou spolehlivost na minimálně 10 000 spínacích cyklů, zajišťují bezpečné přehřátí elektrod a dostatečný startovací proud pro delší životnost zdroje (o více než 25 % v porovnání s obyčejným startérem). Jejich špičková kvalita a dlouhá životnost zajišťuje bezproblémový provoz a minimální provozní náklady. Na konci života dochází k jejich odpojení pro zajištění maximální bezpečnosti.

Nově upravený tvar vnějšího obalu v horní části, spočívající ve speciálním zářezu, zajišťuje jednoduchou a rychlou výměnu pomocí obyčejného šroubováku, což má za následek zkrácení potřebného času a snížení nákladů na údržbu. Navíc se jedná o jediné startéry na trhu bez obsahu radioizotopů a olova, což je identifikováno zeleně zabarvenou plochou patice. Jednotlivé typy startérů jsou použitelné v určitém rozmezí napájecího napětí a příkonu lampy. Zapojují se buď jednotlivě, nebo tandemově (sériově). Podrobnosti uvádí následující tabulka 2.2:

Tabulka 2.2: Použití startérů

TYP STARTÉRU	ZAPOJENÍ	NAPĚTÍ	PŘÍKON
PHILIPS S2	SÉRIOVÉ	220/240V	4-22W
	JEDNOTLIVÉ	110/130V	4-22W
	JEDNOTLIVÉ	220/240V	4-6-8-15-18-22W
	JEDNOTLIVÉ	220/240V	18W (doporučeno pouze S2)
PHILIPS S10	JEDNOTLIVÉ	220/240V	4-65W
	JEDNOTLIVÉ	220/240V	13W (pouze S10)

Velmi málo rozšířenou skupinou jsou doutnavkové startéry speciální konstrukce, které jsou opatřeny nouzovým vypínačem. Tyto startéry se automaticky vypínají po několika neúspěšných pokusech o zážeh poškozené lampy a je nutné je v takovém

případě opětovně ručně odblokovat.

Dle [Koř99, kapitola startér] se v některých případech u fluorescenčních a také u vysokotlakých lamp používají tepelné startéry, které mají v případě absence napájecího napětí na lampě bimetalové kontakty sevřené. Po připojení do sítě jsou tyto kontakty zahřívány speciálním topným prvkem. Prudkým rozevřením kontaktů dojde k rozpojení obvodu a na indukční cívce se naindukuje napětí, které umožní rozsvícení lampy. Za účelem zvýšení rychlosti rozevření jsou tyto kontakty opatřeny speciálními průtlaky². Vzhledem k tomu, že se kontakty za studena dotýkají, dochází k zážehu rychleji než u doutnavého startéru, protože není potřebný další čas na jejich uzavření. Účinnost těchto startérů je však, stejně jako u doutnavkových, ovlivněna výkyvy napájecího napětí a okolní teplotou.

Další skupinou startérů jsou startéry elektronické, které otevírají obvod zahřívání elektrod pomocí triaku, tedy bez účasti mechanických bimetalových kontaktů. Díky elektronickému systému je stabilní a rychlý zážeh výboje v zářivce možný v širším rozmezí výkyvů napětí v napájecí síti a okolní teploty. Tyto startéry eliminují pokusy o zážeh poškozeného světelného zdroje. Příkladem elektronických startérů jsou S2-E a S10-E, viz obr. 2.16.



S10E 18-75W SIN 220-240V



S2E 18-22W SIN 220-240V

Obrázek 2.16: Typy elektronických startérů PHILIPS S2- E, S10-E [Sta99]

Zmíněné startéry zajišťují okamžité rozsvícení bez blikání maximálně za 1,7 s, čímž výrazně prodlužují životnost světelného zdroje. Zajišťují rovněž spolehlivé automatické odpojení světelných zdrojů při jejich poruše nebo konci jejich života a garantují spolehlivost na 100 000 bezpečných startů. Sám startér má 4× delší životnost

² Průtlak je tvarová deformace kontaktu - předpružení, která zajišťuje mžikové rozevnutí. Vyrábí se protlačením drážky nebo důlku do kontaktu

oproti běžnému. Toto všechno ovlivňuje celkové investiční náklady směrem dolů.

2.4.2 Stabilizace zářivky a typy stabilizačních prvků

Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly 2.3.3, charakteristickou vlastností výbojek, v nichž vzniká světelné záření v důsledku výboje v parách kovů nebo plynů, je obrácený poměr proudových a napěťových charakteristik. Statická voltampérová charakteristika elektrického výboje má tedy záporný charakter ($dI/dU < 0$) a nárůstu proudu lampy tak odpovídá snížení napětí na světelném zdroji, viz obr. 2.13.

Po zapálení výboje se proud výbojky rychle zvětšuje vlivem nárazové ionizace, která se lavinovitě šíří a napětí na elektrodách potřebné k udržení výboje v trubici klesá. V ustáleném stavu je pak provozní napětí proti zápalnému nižší. To je nevýhodné nejen z provozního hlediska, kdy je třeba vznikající napěťový rozdíl snížit stabilizačním prvkem, ale znamená to i snížení měrného výkonu zdroje. Proto se zápalné napětí snižuje například přidáním malého množství inertního plynu (vzácné plyny mají nejnižší zápalné napětí) k náplni trubice, nebo umístěním pomocné elektrody spojené s jednou elektrodou v blízkosti druhé hlavní elektrody, nebo snížením výstupní práce potřebné k uvolnění elektronu z povrchu katody jejím předehřátím, popř. trvalým žhavením apod.

Okamžité napětí na stabilizačním prvku U_{ST} je dáno rozdílem napětí sítě a napětí na zářivce, tedy

$$U_{ST} = U_{NAP} - U_{LAMP} \quad (2.6)$$

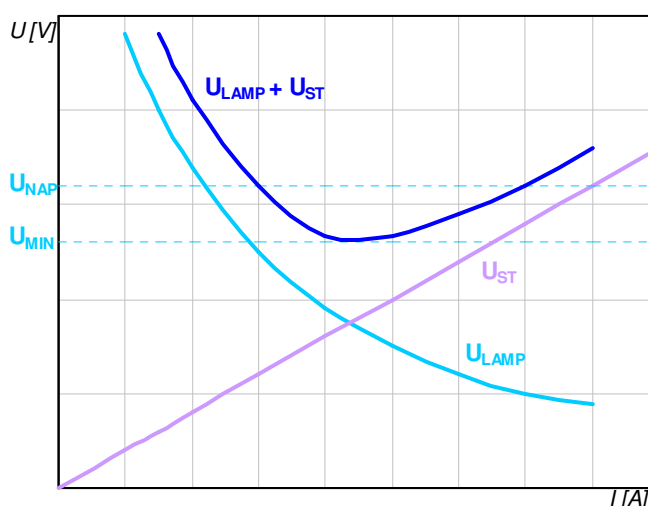
Absence stabilizačního prvku v obvodu by znamenala rovnost napětí $U_{LAMP} = U_{NAP}$, což by mělo za následek, že i sebemenší zvýšení proudu procházejícího zářivkou, vyvolá na zářivce úbytek napětí, a naopak, mírné snížení proudu zářivky, vyvolá zvýšení napětí na zářivce, jak ukazuje VA charakteristika na obrázku 2.13. Při přímém připojení výbojky ke zdroji napětí by po zapálení výboje proud vzrostl z počáteční nulové hodnoty až téměř na hodnotu zkratového proudu, což by vedlo ke zničení výbojové trubice nebo vybavení pojistky. Proto je nutno u výbojek omezit vzrůst proudu přidáním stabilizačním prvkem umístěným vně trubice, jehož voltampérová charakteristika má kladný charakter ($dI/dU > 0$).

Stabilizační prvek se zapojuje do obvodu mezi zářivku a příводы napájecího napětí, viz obr. 2.3. Proud procházející tímto prvkem je roven proudu zářivky I_{LAMP} , a je možné jej vyjádřit pomocí síťového napětí a impedance stabilizačního prvku takto:

$$I_{\text{LAMP}} = (U_{\text{NAP}} - U_{\text{LAMP}}) / Z_{\text{ST}}, \quad (2.7)$$

kde I_{LAMP} proud tekoucí zářivkovou trubicí,
 U_{LAMP} napětí na zářivce,
 U_{NAP} síťové napájecí napětí,
 Z_{ST} impedance stabilizačního prvku,

přičemž platí vzorec (2.6), kde je napětí na stabilizačním prvku dáno rozdílem mezi napájecím napětím a napětím lampy. Maximální proud zářivky je omezen napájecím napětím. Tímto způsobem je možné vyřešit otázku stabilizace pro všechna napájecí napětí, která jsou vyšší než U_{MIN} , viz obr. 2.17.



Obrázek 2.17: Voltampérová charakteristika zářivky zapojené do série se stabilizačním prvkem, díky kterému požadované napětí na zářivce (lampě) vzrůstá s rostoucím proudem lampy; následkem je stabilnímu stav [App00].

Nejčastější metodou proudového omezení při činnosti výbojových světelných zdrojů je používání indukčních zařízení, např. stabilizačních prvků v podobě tlumivky. Možná je ale stabilizace i prostřednictvím rezistoru nebo kondenzátoru. V případech, kdy je vyžadována vysoká hodnota zápalného napětí, např. u vysokotlakých výbojek, je třeba výbojku napájet z rozptylového transformátoru, který zajišťuje nejen stabilizaci výboje, ale i potřebný zážehový impuls. Tento impuls je také možné vytvořit prostřednictvím speciálního startéru.

Ačkoliv nejjednodušším typem proudového omezovače je rezistor, má výraznou nevýhodu spočívající v jeho zahřívání, které vede k velkým ztrátám elektrické energie ve formě tepla. Omezení proudu jeho prostřednictvím je proto velmi neekonomické. Zařazení rezistoru do série s výbojkou je však jediným způsobem stabilizace výbojek připojených na stejnosměrné napětí. Protože se na rezistoru ztratí až 50 % energie, je při provozu nutné, aby napájecí napětí bylo alespoň dvojnásobkem napětí zářivky U_{LAMP} .

Výrazného zlepšení účinnosti lze dosáhnout použitím rezistoru s velmi výraznou pozitivní teplotní charakteristikou PTC, který se využívá právě k omezení proudu obvodem. V praxi se používají pouze v tzv. rtuťově-žárovkových lampách, v nichž jako rezistenční proudový omezovač funguje wolframová spirála. Teplotní závislost rezistoru kompenzuje změny v proudu zářivky vyplývající z kolísání síťového napětí. Postačující velikost síťového napětí je o 25 až 30 % více než napětí zářivky.

Velikost stabilizačního prvku se volí tak, aby při daném proudu zářivky vzniklo na stabilizačním prvku napětí U_{ST} dle vzorce (2.6). Při stabilizaci rezistorem a střídavém napájecím napětí je situace obdobná jako při stejnosměrném napájecím napětí, ale výbojka zapaluje a zhasíná v každé půlperiodě. Z důvodu ne hospodárnosti stabilizace rezistorem je při střídavém napájení vhodnější stabilizace tlumivkou, popřípadě kondenzátorem.

Při stabilizaci kondenzátorem jsou energetické ztráty sice minimální, ale nelze jej použít samostatně. Příčinou je, že díky němu má proud zářivky v každé půlperiodě tvar úzkého vysokého impulsu. Oproti stabilizaci tlumivkou se zvětšuje časový interval nulového proudu a vzrůstá i vliv stroboskopického efektu. Stabilizace kondenzátorem je přijatelnou volbou u velmi vysokých frekvencí. S ohledem na snížení životnosti světelných zdrojů se však v praxi nevyužívá.

Stabilizace tlumivkou je výhodná s ohledem na opakující se zapalování v každé půlperiodě střídavého proudu. Její další předností je, že v kombinaci se startérem může vytvořit napěťový zážehový impuls potřebný k zapálení zářivky. Zapalování je usnadněno jednak deformací napěťové křivky a jednak i fázovým předstihem napětí, to znamená, že časový interval nulového proudu je podstatně potlačen. Tlumivky mají vyšší ztráty než kondenzátory, ale při 50 Hz produkují daleko menší zkreslení proudu zářivky. Tlumivka má podobu vrstveného svazku ocelových plechů, které tvoří jádro, na němž je vinutí z měděného drátu. Právě na průměru měděného drátu a konstrukci tlumivky závisí z velké části tepelné ztráty, způsobené odporem vinutí a hysterezí jádra

tlumivky. Emise velkého množství tepla způsobuje podstatné snížení výkonu. Tzv. nízkoztrátová tlumivka je podobná klasické, ale její jádro je vyráběno z vysoce jakostní oceli a drát vinutí má větší průměr, což umožňuje redukovat ztráty elektrické energie. Náklady na předřadníky s nízkoztrátovou tlumivkou jsou jen nepatrně vyšší než u klasické verze. Kvůli optimálnímu proudu zářivky je také potřeba volit impedanci tlumivky dle napájecího napětí, frekvence, typu a napětí zářivky. Jinak řečeno, každý typ zářivky potřebuje pro každé napájecí napětí tlumivku se specifickou impedancí. Pro stabilizaci je tedy nejdůležitější hodnota impedance tlumivky, která je vyjádřena poměrem napětí a proudu

$$Z = \frac{U_{ST}}{I_{LAMP}} \quad (2.8)$$

a definována pro příslušné napájecí napětí, síťovou frekvenci a běžný jmenovitý proud zářivky. Impedance tlumivky je přitom ovlivněna frekvencí napájecího napětí:

$$Z = \omega L, \quad (2.9)$$

kde ω je úhlová frekvence $\omega = 2\pi f$ (rad.s⁻¹),
 f je frekvence (Hz).

Protože je indukčnost L závislá na počtu vinutí, rozměrech a materiálu jádra tlumivky, znamená to, že s vyšší frekvencí může být použita tlumivka menších rozměrů. Proto například u elektromagnetického předřadníku pracujícím na 50 nebo 60 Hz je potřeba větší tlumivka v porovnání s předřadníkem vysokofrekvenčním, kde postačí tlumivka menší z feromagnetického materiálu.

Za předpokladu splnění podmínky, tj. aby síťové napětí bylo alespoň dvojnásobkem napětí výboje zářivky, mohou být tlumivky použity pro prakticky všechny výbojky. Je-li síťové napětí příliš nízké, měly by být použity jiné typy obvodů, např. transformátor. Použití tlumivek, stejně jako i jiných stabilizačních prvků, má své výhody i nevýhody. Výhodou jsou nízké výkonové ztráty v porovnání s rezistorovými a jednoduché zapojení tlumivky v obvodu svítidla, tedy do série s lampou. Nevýhodou je fázový posun proudu lampy vzhledem k síťovému napětí díky vlastnostem tlumivky. Další nevýhodou je vysoký startovací proud, který je přibližně 1,5 násobkem jmenovitého proudu, a citlivost ke kolísání síťového napětí, kdy kolísání síťového napětí způsobuje kolísání proudu procházejícím lampou [Nov08a], [Nov08b].

2.5 Výbojová trubice

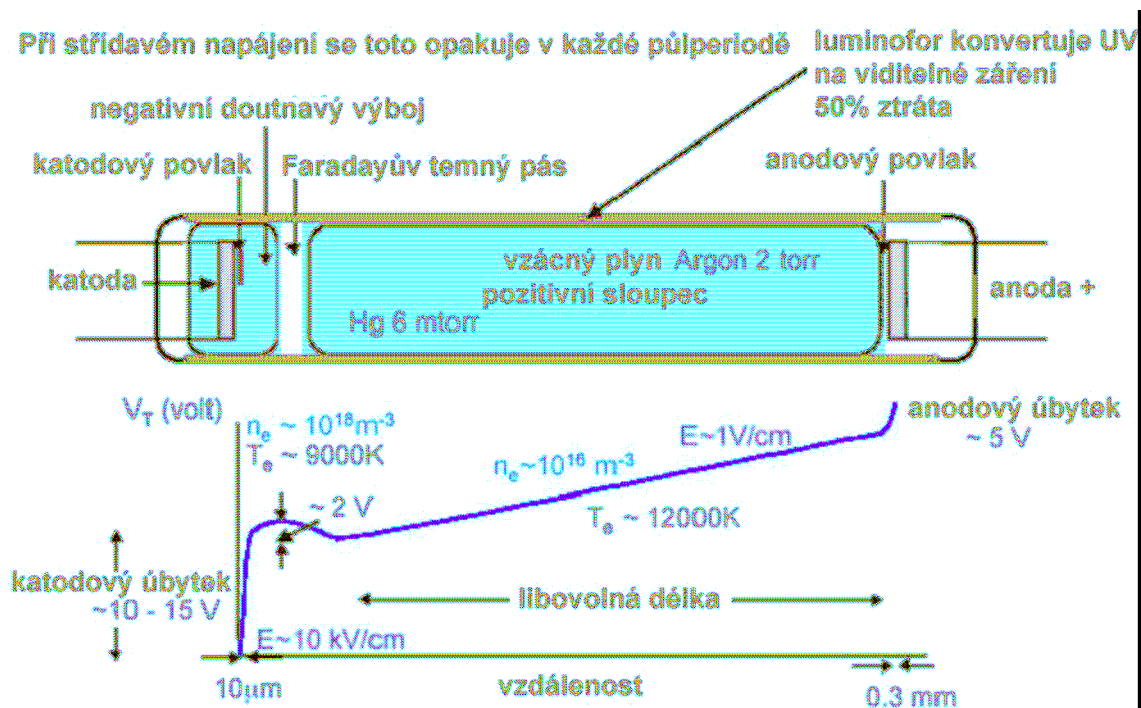
Jde o nízkotlaký skleněný válec vyrobený z měkkého skla, který je vyplněn inertním plynem o nízkém tlaku v jednotkách torrů³ a malým množstvím rtuti, přičemž rtuť je přítomna jak v tekutém, tak i plynném stavu v řádech 10^{-3} torrů. Inertním plynem bývá většinou argon nebo směs argonu a kryptonu. Pracovní teplota plynové náplně se pohybuje okolo 300÷700 K. Teplota elektronů určená jejich rychlostí je cca 12 000 K. Na každém konci výbojové trubice jsou zataveny wolframové elektrody, na kterých je nanášena emisní hmota na bázi oxidů barya, vápníku a stroncia. Vnitřek trubice je pokryt směsí fluorescenčního prášku neboli luminoforu, který mění silné krátkovlnné ultrafialové záření rtuťového výboje o účinnosti přibližně 75 %, do vyšších vlnových délek viditelného pásma neboli na viditelné světlo. Vhodnou kombinací fluorescenčních prášků je možné ovlivňovat barvu světla, a tak je koncipovat pro různé způsoby využití. Účinnost luminoforu však dosahuje maximálně 50 %. Rtuťový výboj je vyvolán elektrostatickým polem z elektrod a probíhá v nasycených parách rtuti při tlaku přibližně 0,8 Pa, který odpovídá teplotě nejhladnějšího místa zářivky (cca 42 °C), a v inertním plynu, který snižuje zápalné napětí výboje a snižuje rychlost odpařování emisní vrstvy z elektrod. Kolem elektrod je na neutrálním přívodu umístěna ochranná kovová clonka, která zabraňuje usazování vypařující se a rozprašující se emisní hmoty na vrstvě luminoforu. Clonka zároveň slouží jako koncentrátor plazmatu a snižuje úbytek napětí na elektrodě a udržuje správnou teplotu vlákna během svícení. Fyzikální proces uvnitř zářivky nejlépe vystihuje obr. 2.18, na kterém je zakreslen výbojový prostor zářivkové trubice a napěťová charakteristika při stejnosměrném napájení⁴.

Výbojový prostor sestává z několika základních intervalů. Poblíž katody se nachází tenká svítící vrstva, tzv. katodová svítící vrstva neboli povlak. Prostor mezi touto vrstvou a katodou se nazývá Astonovým temným prostorem. Z druhé strany svítící vrstvy se nachází slabě svítící Crookesův tmavý prostor, často uváděný jako prostor katodového spádu, který přechází ve svítící oblast zvanou doutnavé světlo. Všechny tyto vrstvy tvoří katodovou část doutnavého výboje. S oblastí doutnavého výboje hraničí Faradayův temný prostor. Hranice mezi nimi je neostrá. Zbývající část výbojové trubice je tvořena kladným (pozitivním) anodovým sloupcem⁵ [Ele10].

³ Torr, nebo také milimetr rtuťového sloupce značený mm Hg, je stará jednotka tlaku nazvaná dle italského přírodovědce J. E. Torricelliho, která byla v roce 1980 nahrazena jednotkou SI - Pascal. 1 torr odpovídá přibližně 133,322 Pa.

⁴ Při střídavém napájení se tento jev opakuje v každé půlperiodě.

⁵ Při snížení tlaku se katod. část výboje a Farad. temný pás rozšiřují, kladný sloupec se zkracuje



Obrázek 2.18: Oblast výboje zářivky a napěťová charakteristika při stejnosměrném napájení [Šol04]

Potenciál podél trubice se mění nerovnoměrně [Ele10]. Téměř celý spád napětí připadá na první tři intervaly výbojového prostoru až po temný Crookesův prostor včetně, tzv. katodový spád napětí. V oblasti doutnavého výboje se potenciál nemění a intenzita pole je rovna nule. V poslední fázi, tj. ve Faradayově temném prostoru a kladném sloupci, potenciál pomalu roste. Toto rozdělení potenciálu je způsobeno vznikem kladného náboje v oblasti Crookesova temného prostoru.

Základní procesy, potřebné k udržení doutnavého výboje probíhají v jeho katodové oblasti. Jedná se o sekundární elektronovou emisi z katody, způsobenou jejím bombardováním kladnými ionty a nárazovou ionizací molekul plynu elektrony. Ve výbojové dráze jsou přítomny jak elektricky nabitě částice, tj. kladné a záporné ionty a volné elektrony, tak i částice elektricky neutrální, tj. atomy a molekuly. Následkem silového působení elektrického pole získávají elektricky nabitě částice zrychlení. Protože mají elektrony oproti iontům menší hmotnost, získávají na kratší dráze větší zrychlení a tím i větší rychlost.

Kladné ionty, urychlené katodovým spádem napětí, mají při dopadu na katodu dostatečně velkou energii k vyražení elektronů z atomů katody. Tyto elektrony pak tento prostor opouštějí s nevelkou rychlostí. V Astonově temném prostoru jsou

urychlovány působením silného elektrického pole. Při dosažení dostatečné energie jsou schopny budit molekuly plynu a v důsledku toho dojde k vyvolání záření v katodové vrstvě. Elektrony, které proletěly beze srážek do oblasti Crookesova temného prostoru, mají velkou energii, a proto, namísto buzení, molekuly spíše ionizují. Intenzita záření plynu tak klesá a v Crookesově prostoru se vytváří mnoho elektronů a kladných iontů. Protože kladné ionty mají oproti elektronům větší hmotnost, mají menší zrychlení a zůstávají tak v Crookesově prostoru déle. V Crookesově prostoru tak vzniká kladný prostorový náboj, čímž nedochází k rovnoměrnému poklesu potenciálu na trubici jako u homogenního vodiče, ale naopak dochází k přerozdělení potenciálu podél trubice a ke vzniku katodového spádu potenciálu. Jde o největší spád potenciálu, který je roven téměř celému napětí mezi elektrodami. Rozložení potenciálu závisí na druhu plynu, a na materiálu, ze kterého je katoda vyrobena.

Elektrony, které vznikly při ionizaci v Crookesově prostoru, pronikají spolu s primárními elektrony do oblasti doutnavého výboje, která je charakterizována vysokou koncentrací elektronů, kladných iontů a celkovým prostorovým nábojem, blízkým nule (plazma). Intenzita pole je zde proto velmi malá, tzn., že pole neurychluje elektrony a ani ionty. Díky vysoké koncentraci elektronů a iontů dochází v této oblasti ke značné rekombinaci a tím ke vzniku záření.

Na hranici mezi oblastí doutnavého výboje a Faradayovým temným prostorem je pole nulové a vysoký gradient koncentrace elektronů a iontů. Z oblasti doutnavého světla pronikají do Faradayova temného prostoru elektrony a kladné ionty formou difúze. V důsledku nižší koncentrace nabitých částic pravděpodobnost rekombinace ve Faradayově prostoru výrazně klesá, a proto je tento prostor temný.

Ve Faradayově prostoru již existuje elektrické pole, díky kterému dochází k urychlení elektronů, které postupně získávají energii. Vlivem nárazové ionizace vznikají kladné ionty a dochází k záření kladného anodového sloupce. Tento sloupec se vyznačuje konstantním elektrickým polem, bývá nejdelší částí zářivého prostoru v trubici a má charakteristickou barvu plynu.

Lineární zářivky jsou vyráběny v široké škále o průměrech \varnothing 38, 26, 16, 7 mm označované T12, T8, T5, T2⁶, v délkách 136÷1500 mm a výkonech 4÷65 W.

⁶ značení firmy Philips: T – tubular a 12...2 násobený 1/8 palce je roven průměru trubice, např. T12 → 12 · 1/8 palce = \varnothing 38 mm.

2.5.1 Světelné technické parametry

- Světelné parametry

Světelný tok - udává, kolik světla celkem vyzáří zdroj do všech směrů. Jedná se o světelný výkon, který je posuzován z hlediska citlivosti lidského oka. Jednotkou je Lumen [lm].

Měrný výkon - vyjadřuje, jaké množství světla se vyrobí z jednotky energie a je stanoven jako podíl světelného toku zdroje k elektrickému příkonu v lm/W.

Index barevného podání - značí se zkratkou R_A . U žárovek je $R_A = 100$, u výbojových zdrojů nižší. Tento index určuje kvalitu podání barev osvětlovaného prostoru. Měl by se pohybovat ve skupině 1A, $R_A = 100 \div 90$, nebo ve skupině 1B, $R_A = 90 \div 80$.

- Elektrické parametry

Velikost napájecího napětí

Připojení na napájecí soustavu

Celkový příkon

- Ekonomické parametry

Cena zdroje

Technický život (životnost) – pro každý typ světelného zdroje udává výrobce technický život jako tzv. střední dobu životnosti v hodinách a znamená, že po uvedené době svítí ještě nejméně 50 % světelných zdrojů. Ve skutečnosti jsou světelné zdroje mnohem trvanlivější.

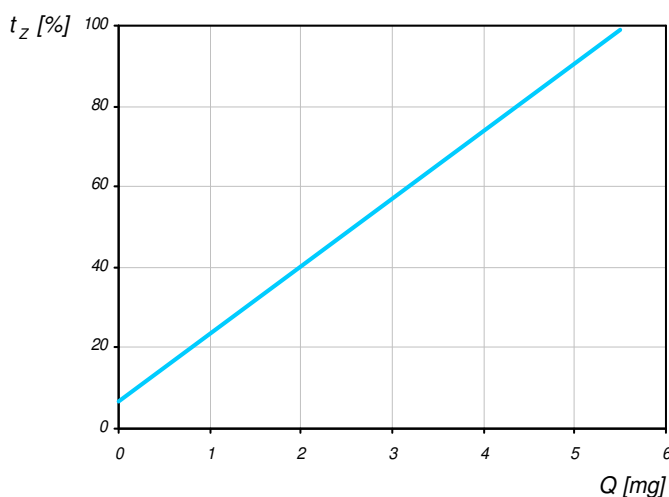
Cena produkce světelného množství – určuje výkonnost použití typu světelného zdroje. Jednotková produkce je představována cenou v Kč, kterou zaplatí uživatel za vyrobené množství světla – obdoba za dodanou jednotku tepla.

2.5.2 Životnost zářivky

Životnost světelných zdrojů je statistickou veličinou. Nelze proto předpovědět, kdy přesně konkrétní zdroj přestane svítit, ale je možné říci, s jakou pravděpodobností se tak v určité době stane. K tomuto účelu se sestavuje tzv. křivka životnosti, která udává, jaké procento zdrojů z testovaného souboru svítí po určité době. Obvykle udávaným parametrem je střední doba technického života, což je doba, po které ještě svítí 50 % testovaného souboru zdrojů. Životnost zářivek, stejně jako i jiných světelných zdrojů, je definována poklesem světelného toku o určitou hodnotu z původní jmenovité hodnoty v % nebo přerušením jejich svícení. Dle [Daš02] obvykle končí životnost při poklesu

světelného toku zdroje pod 70 % jmenovité hodnoty. Životnost závisí na mnoha faktorech jak konstrukčního, tak i provozního charakteru, přičemž provozní faktory jsou v první řadě dány vlastnostmi předřadného zařízení. Mezi ovlivňující faktory může patřit například kvalita světelného zdroje, počet zapnutí, kolísání napětí v síti, teplota okolí nebo frekvence napětí.

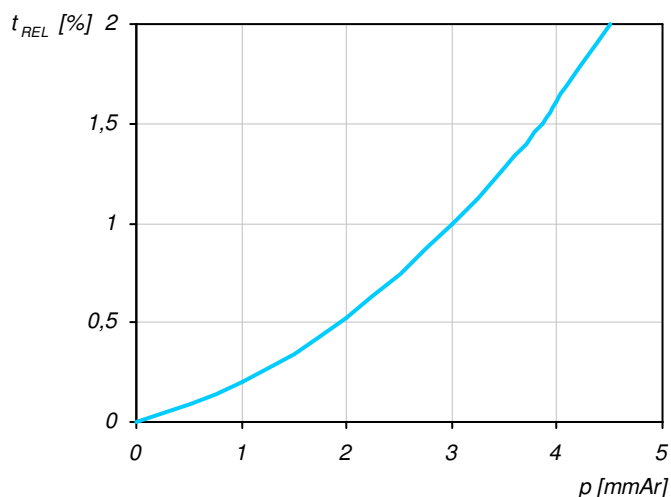
Dle mnohaletých zkušeností je světelný tok zářivek většinou negativně ovlivňován špatnou stabilitou nebo malou chemickou odolností použité luminiscenční látky a nestálostí emisní hmoty elektrod proti rozprašování. Při malém poklesu světelného toku se doba života zářivky posuzuje dle deaktivace elektrod, tj. vypaření a rozprášení vrstvy kyslíčnicků zásaditých zemin, následkem čehož zářivka nezapaluje. Dojde-li k rozprášení emisní hmoty, konce zářivky zčernají. Na pravděpodobné době života se tedy podílí množství emisní hmoty nanesené na katodě. Je ale důležité poznamenat, že množství emisní hmoty na katodách nelze výrazně navyšovat, neboť silná vrstva hmoty snadno odpadává. Prostřednictvím mnoha pokusů byla proto nalezena optimální tloušťka této vrstvy. Vztah závislosti doby života zářivky na množství emisní hmoty nanesené na elektrodě je graficky znázorněn na obrázku 2.19.



Obrázek 2.19: Závislost doby života zářivky na množství emisní hmoty nanesené na elektrodě (katodě) [Kin64]

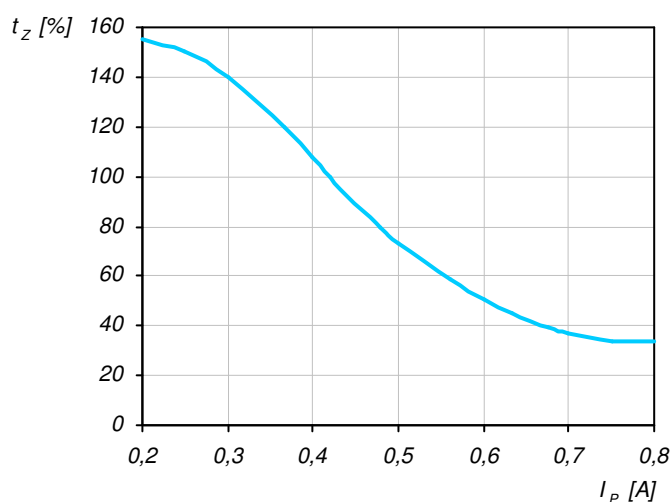
Vliv na životnost zářivky má i tlak plynné náplně, většinou argonu. Ten, kromě usnadnění zápalu v zářivce, zabraňuje rozprašování emisní hmoty z elektrod. Se zvyšováním tlaku plynu životnost velmi rychle roste, protože vyšší tlak plynu zamezuje rozprašování a vypařování emisní hmoty. Rozprašování je tedy tím menší, čím vyšší je

tlak a naopak. Protože tlak plynné náplně ovlivňuje zápalné napětí, nelze jej libovolně zvyšovat. Vyšší tlak má za následek obtížnější zapalování a pokles měrného výkonu. Zářivky s nižším tlakem se tedy zapalují snáze i při nižších teplotách, ale snižuje se tím doba jejich života. Nejužívanější tlak plynné náplně je 3 mm Hg ^{pozn. 3 (str. 42)}. Zmíněnou závislost vystihuje obr. 2.20.



Obrázek 2.20: Závislost doby života zářivky na tlaku argonové náplně [Kin64]

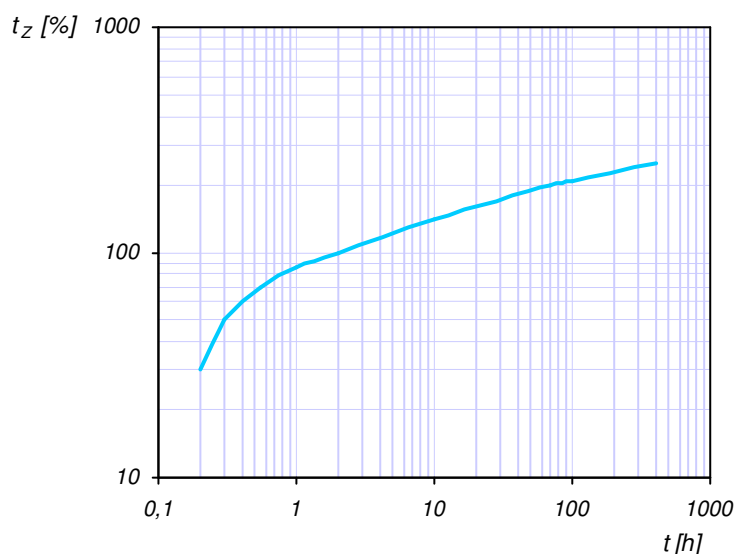
Životnost je dále ovlivněna velikostí pracovního proudu, protékajícího zářivkou. Například pro 40 W zářivku dosahuje, při proudu 0,2 A, životnost vrcholové hodnoty přibližně 150 %. Se vzrůstajícím pracovním proudem, životnost zářivky rychle klesá.



Obrázek 2.21: Závislost doby života zářivky na pracovním proudu [Kin64]

Zajímavostí ale je, že životnost klesá i při proudech nižších, než při kterém životnost dosahuje své vrcholové hodnoty. Příčinou poklesu životnosti při menších proudech je, že pro přenos menšího proudu je třeba méně elektronů. Menší počet urychlovaných elektronů vytváří menší počet ionizovaných atomů, a tím i menší počet iontů, které dopadem na katodu předávají katodě svou kinetickou energii. To způsobuje, že elektrody jsou nedostatečně nažhaveny a vlivem potenciální emise se rychleji zničí. Tento vztah vystihuje graf na obrázku 2.21.

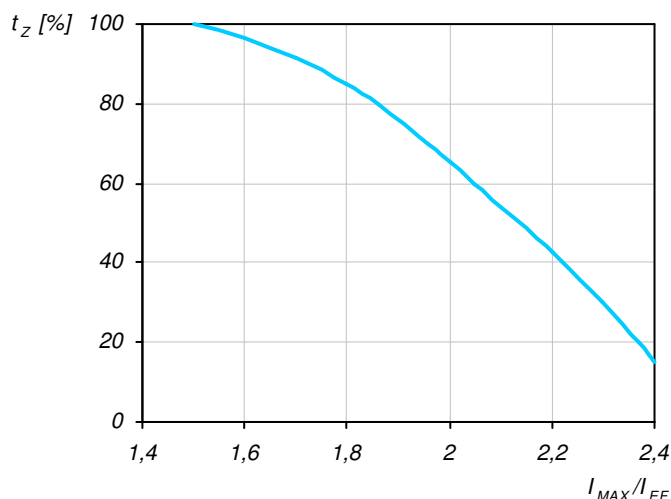
Podstatný vliv na životnost zářivek má i počet zapálení zářivky, protože při zapalování dochází na katodách k největšímu opotřebení. Zásadní je také způsob zapalování výboje, zejména udržení provozní teploty vláken zářivky v předepsaném pásmu. Graf na obrázku 2.22 udává vztah doby svícení na jedno zapálení při zapalování s předžhavením doutnavkovým startérem. Podle standardů pro testování zářivek, 100 % životnost odpovídá 3 hodinám svícení připadajícím na jedno zapálení. Pokud tedy zvýšíme dobu svícení na jedno zapálení například na 10 hodin, prodlouží se životnost řádově o 45 %.



Obrázek 2.22: Závislost doby života zářivky na počtu hodin svícení připadajících na jedno rozsvícení [Kin64]

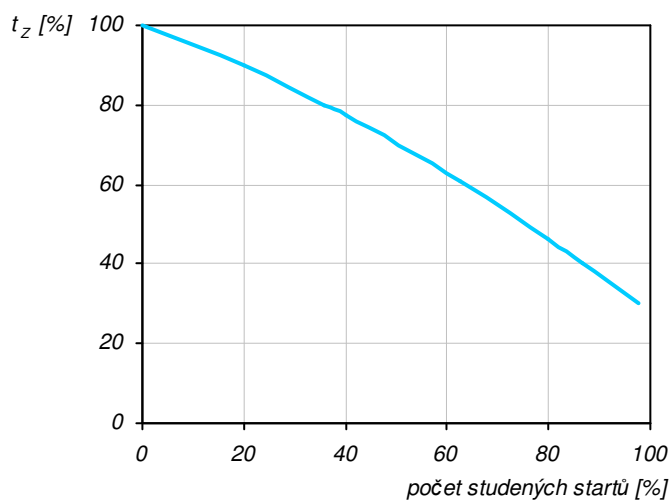
V aplikacích, kde je střední doba svícení na jedno zapálení krátká, je nutné optimalizovat zapalovací proces zářivky. V opačném případě dramaticky poklesne životnost.

Na době životnosti zářivky se rovněž podepisuje tvar proudové křivky, který se vyjadřuje tzv. činitelem tvaru. Činitel tvaru je roven poměru vrcholové a efektivní hodnoty proudu. Pokud je proudová vlna zkreslená, je životnost kratší, protože pro stejný příkon zářivky je třeba většího efektivního proudu a katody jsou namáhány vrcholovými hodnotami proudu, viz obr. 2.23.



Obrázek 2.23: Závislost doby života zářivky na tvaru proudové křivky [Kin64]

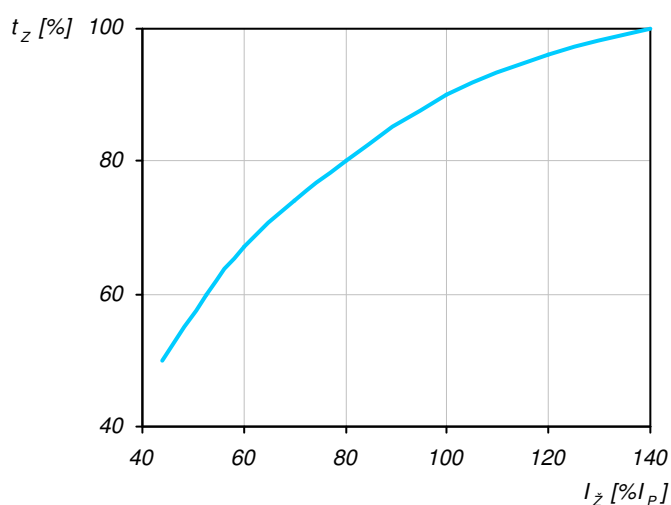
Životnost zářivek může být nepříznivě ovlivněna také nevhodným startérem, obsaženým v předřadném zařízení. Například graf na obrázku 2.24 udává nepřímo dobu života zářivek v závislosti na teplotě katod v okamžiku, kdy startér rozpojí.



Obrázek 2.24: Závislost doby života zářivky na počtu studených (mžítkových) startů [Kin64]

Velmi často se totiž stane, že startér rozpojí dříve, než je katoda dostatečně nažhavena a potom dochází k mžítkovému neboli studenému startu. Trubice v takovém případě zapálí vlivem špičkového napětí vzniklého přechodovým jevem na indukčnosti. Při mžítkovém startu dochází k vytrhávání kousků emisní hmoty z katod, což urychluje jejich opotřebení a tím deaktivaci. Z toho je patrné, že snáze zažehující zářivka bude mít kratší životnost.

Dalším faktorem ovlivňujícím životnost zářivek je velikost žhavicího proudu, obr. 2.25. Zářivkové startéry jsou sestaveny tak, aby za určitou dobu rozpojily žhavicí obvod zářivky. Při menším proudu budou za stejnou dobu elektrody nedostatečně nažhaveny, takže bude docházet k zážehu při nedostatečně nažhavených elektrodách. Žhavicí proud je omezován například kompenzací účinníku sériovou kapacitou, kdy se do série s tlumivkou zapojuje kondenzátor. Tento kondenzátor představuje pro střídavý proud o kmitočtu 50 Hz určitou impedanci. Tím se zmenšuje žhavicí proud a zároveň i nepatrně zkracuje životnost zářivek.



Obrázek 2.25: Závislost doby života zářivky na velikosti žhavicího proudu[Kin64]

2.6 Kompenzační kondenzátor

Kvalita kompenzace se udává účínkem $\cos \varphi$, daného kosinem fázového posuvu mezi napětím a proudem, nebo poměrem činného a zdánlivého výkonu, přičemž nízký účinek znamená větší spotřebu energie a nákladů, menší množství elektřiny rozváděné sítí, ztráty v síti, v transformátorech a větší úbytek napětí v rozvodných sítích. K nedůležitějším součástem systémů pro kompenzaci jalového výkonu (z angl. *Power Factor Correction*) patří kompenzační kondenzátory.

V obvodech zářivek je elektrická síť zatěžována prostřednictvím indukčního charakteru tlumivky předřadníku v ustáleném provozu. Účinek $\cos \varphi$ nekompenzovaných zářivek s indukčním předřadníkem se pohybuje v rozmezí $0,35 \div 0,6$. Zapojení kompenzačních kondenzátorů do jejich obvodů je tedy pro zlepšení účinku nezbytné. V konstrukci jednotlivých světelných zdrojů se vyskytují rozdíly, které vyžadují individuální výběr kapacity kondenzátoru.

Ačkoliv se teoreticky za ideální stav považuje $\cos \varphi = 1$, v praxi není dosažení této hodnoty cílem. Důvodem může být překompenzování vlivem změn zátěže nebo možnost vzniku rezonance, při které by se cívky chovaly jako ve stejnosměrném obvodu – jednalo by se v podstatě o zkrat. Dodavatelé elektrické energie uvádějí hodnotu $\cos \varphi_2$, na kterou by daný účinek $\cos \varphi_1$ měl být kompenzován. Kompenzace tak patří mezi významná úsporná opatření při rozvodu elektrické energie a dodavatel tak (za opory legislativy) vyžaduje odběr elektrické energie s induktivním účínkem v pásmu $0,95 \div 1$.

Obecně jsou používány tyto druhy kompenzace:

- **individuální** – každý spotřebič má své vlastní kompenzační kondenzátory
- **skupinová** – kompenzuje danou skupinu spotřebičů (např. v dílně) jedním zařízením, nebo skupinu zářivek v jednom svítidle
- **centrální** – kompenzuje celé odběrné místo, centrálně, v rozvodně pro celý závod. Musí být opatřena regulátorem, který zaručuje dodržování účinku v požadovaném rozsahu.

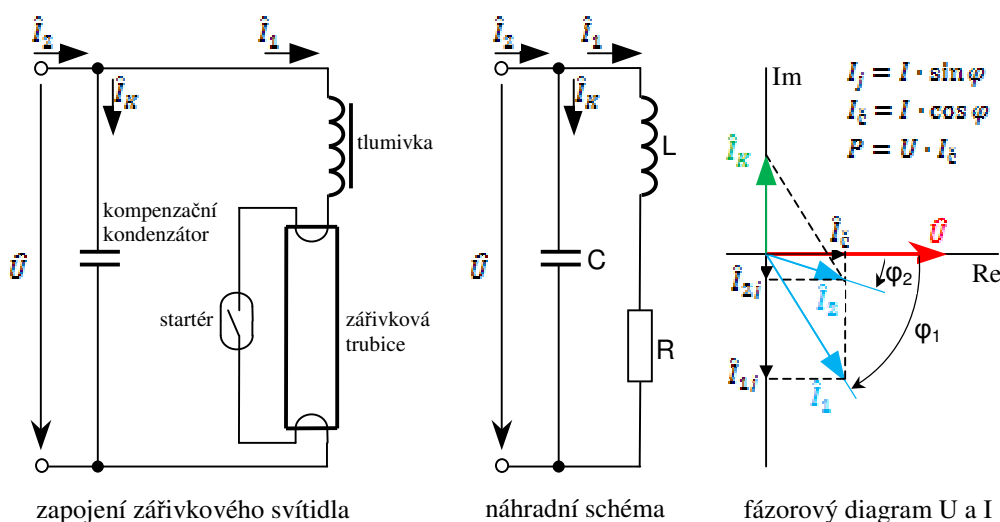
V obvodech zářivek se používá kompenzace individuální, přičemž je možné ji zapojit paralelně nebo sériově k zátěži.

V podmínkách ČR je nejběžnější kompenzace paralelní. Kondenzátor se u této kompenzace připojuje mezi vstupní svorky napájecího napětí 230 V, tj. fázi a střední vodič, viz obr. 2.3. Jeho kapacita se určuje podle vztahu

$$C = \frac{P}{\omega \cdot U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \quad (2.10)$$

a je pro jednotlivé předřadníky navrhována výrobcí tak, aby se hodnota účinníku $\cos \varphi$ pohybovala v rozmezí 0,95÷0,98. Typické hodnoty kondenzátoru pro paralelní kompenzaci jsou 4,5 μF pro zářivku s výkonem 36 W a 6,5÷7 μF pro 58 W [App00]. Selhání kondenzátoru v tomto zapojení bude mít za následek přerušení kompenzace, popř. vznik zkratu. Přerušení kompenzace se projeví přibližně dvojnásobným odběrem síťového proudu. Chování svítidla však nebude nijak ovlivněno, a proto se doporučuje v osvětlovacích systémech pravidelně kontrolovat síťový proud nebo účinník.

Výše uvedený vztah (2.10) lze odvodit z rovnosti jalového výkonu kondenzátoru a zátěže. Je možné vycházet z fázorových diagramů a obecně platných vztahů, znázorněných na obrázku 2.26, kde je zároveň uvedeno standardní i náhradní zapojení zářivky s paralelní kompenzací:



P	činný výkon
I_1	proud zářivkou bez kompenzace
I_2	proud zářivkou po kompenzaci
I_K	kompenzační proud
I_e	činný proud (ve fázi s napětím)
I_{1j}, I_{2j}	jalové proudy před a po kompenzaci
φ_1, φ_2	fázový posun před a po kompenzaci

Obrázek 2.26: Standardní a náhradní zapojení zářivkového svítidla s paralelním filtračním kondenzátorem včetně fázorového diagramu. [Kol07]

V uvedeném případě se činný výkon odebíraný spotřebičem před a po kompenzaci nemění, tzn., že za předpokladu harmonického průběhu napětí a proudu na zářivkovém svítidle, lze pro jalový výkon kompenzačního kondenzátoru zapsat:

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (2.11)$$

kde

Q_C je jalový výkon požadovaného kompenzačního kondenzátoru,

P je činný výkon odebíraný spotřebičem,

φ_1 je fázový posun před kompenzací,

φ_2 je výsledný fázový posun po kompenzaci.

Účinník před kompenzací je pak roven $\cos \varphi_1$ a po kompenzaci $\cos \varphi_2$.

Na základě znalosti potřebného jalového výkonu lze určit příslušnou kapacitu kondenzátoru takto:

$$C = \frac{Q_C}{\omega \cdot U^2}, \quad (2.12)$$

kde

ω je úhlová rychlost napájecí sítě,

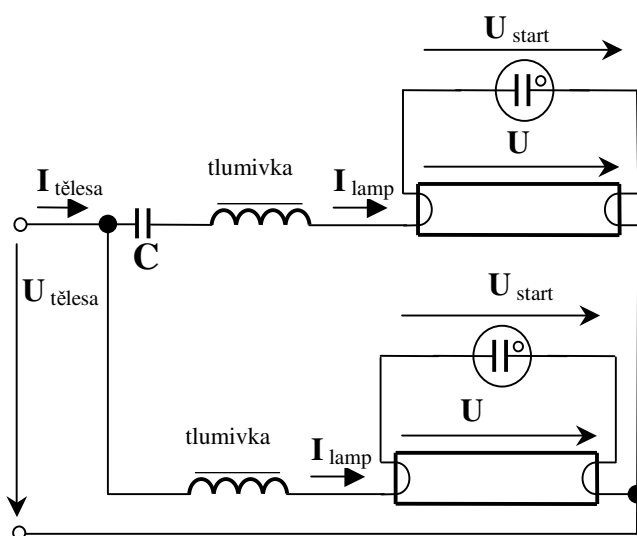
U je napětí, na které je kondenzátor připojen.

V případě, že by se jednalo o trojfázovou kompenzaci, byla by kapacita jednoho kondenzátoru třetinová.

Druhým zmíněným typem kompenzace je kompenzace sériová, která se využívá v tzv. kapacitních nebo DUO zapojeních. DUO zapojení, viz obr. 2.27, je tvořeno paralelním zapojením dvou konvenčních zářivkových obvodů s tím, že k jedné z obou tlumivek je sériově připojen kondenzátor.

Při napájecím napětí 230 V, je velikost napětí na kondenzátoru okolo 400 V. Impedance kondenzátoru je téměř dvakrát vyšší než impedance jedné tlumivky, čímž je omezen proud zářivkou v kapacitní větvi ($\cos \varphi \approx 0,5$) a kompenzován jalový výkon v druhé induktivní větvi ($\cos \varphi \approx 0,5$) tak, že je dosaženo celkového účinníku

$\cos \varphi \approx 0,95$. DUO zapojení je obzvlášť citlivé na přesnou hodnotu kompenzační kapacity, protože pracuje blízko rezonanční frekvence. I malá odchylka kapacity znamená významnou změnu impedance sériového LC obvodu předřadníku a změnu proudu zářivky v kapacitní větvi obvodu. Přiblížením k rezonanci mezi tlumivkou a kondenzátorem dochází také k naindukování vyššího napětí a napět'ovému přetížení kondenzátoru a tlumivky. Selhání kondenzátoru v DUO zapojení bude mít za následek přerušení kompenzace, zhasnutí zářivkové trubice a zhoršení účinníku.



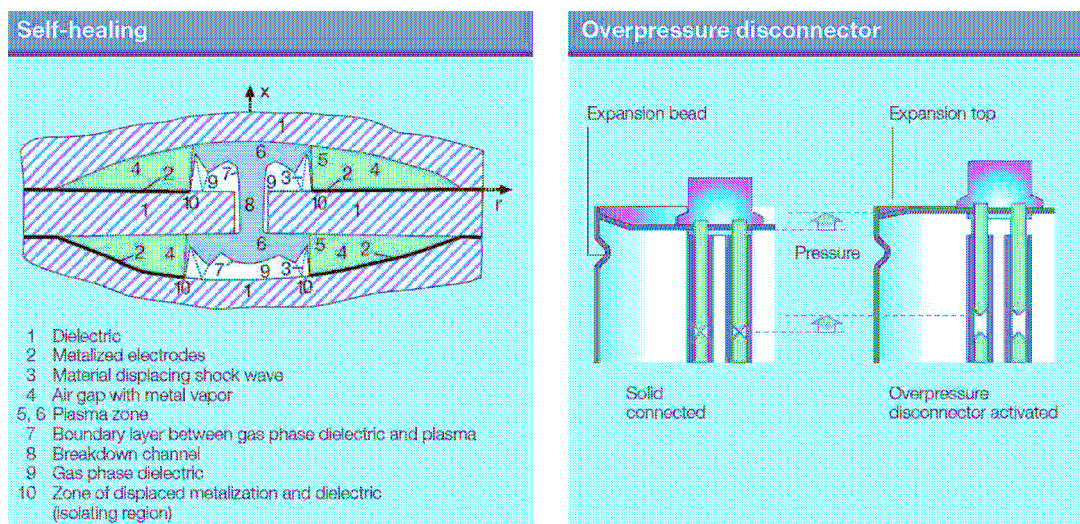
Obrázek 2.27: Zářivkové svítidlo v DUO zapojení se sériovou kompenzací účinníku.

Z důvodu dodržení předepsaných provozních parametrů a hodnot přehřívání jsou při sériové kompenzaci zapotřebí kondenzátory s minimálními tolerancemi ($\pm 4\%$) a vysokou kvalitou, respektive s velmi nízkým ztrátovým činitelem $\text{tg} \delta$. Jmenovitá hodnota kapacity je závislá na napájecím napětí, použité tlumivce a výkonu zářivky. Typické hodnoty jsou $3,4 \mu\text{F}$ pro zářivku s výkonem 36 W a $5,3 \mu\text{F}$ pro 58 W [App00].

Obecně předpokládaná životnost kompenzačních kondenzátorů se udává okolo 130 000 provozních hodin, ale její délka je ovlivňována skutečnými provozními podmínkami, zvláště provozní teplotou kondenzátoru, proudovým a napět'ovým přetěžováním. Při přetěžování hrají velmi významnou roli harmonické proudy, jejichž obsah vede ke zvýšení proudu kondenzátoru. Překračování tohoto proudu má značný vliv na životnost, protože vlivem ztrát dochází k vnitřnímu ohřevu kondenzátoru, což může vést nejen ke zkrácení jeho životnosti, ale i k destrukci. Pokud tedy nastane v síti

neprůznivý stav, je otázka destrukce zpravidla záležitostí i několika vteřin.

Kondenzátory pro zářivková osvětlení a další světelné zdroje s induktivní zátěží jsou vyráběny moderní technologií MKP nebo MKV. Dle [Kom07] se jedná o nejvhodnější a nejúspornější současnou technologii pro kompenzaci účinníku na nízkém napětí. Způsob konstrukce a výroby těchto kondenzátorů zajišťuje výbornou stabilitu kapacity a dlouhou životnost, viz obr 2.28.

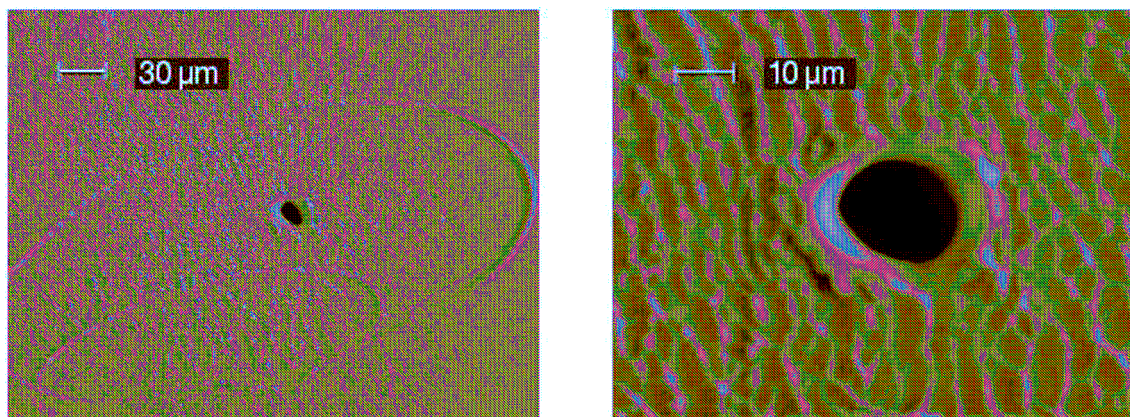


Obrázek 2.28: Konstrukce samoregeneračního kondenzátoru [Kom07]

Dielektrikum obou typů kondenzátorů, jehož tloušťka je funkcí jmenovitého napětí, je tvořeno pokovenou polypropylenovou fólií. Kovem bývá většinou hliník nebo zinek, popř. jejich kombinace. Toto pokovení (metalizace) se významně podílí na dosažení potřebného stupně zvládnutí vysokého proudu a odporu při vysokých provozních teplotách. PP fólie vyniká vysokou regenerační kapacitou, což vede k vysoké životnosti kondenzátoru. Během tepelného či elektrického přetížení kondenzátoru, nebo na konci jeho životnosti, mohou vznikat elektrické oblouky (napěťové průrazy), které způsobují odpaření pokovené vrstvy v místě jejich vzniku, viz obr. 2.29. Tlak plynu, který vznikl působením vysokých teplot, během několika mikrosekund zcela odstraní odpařenou pokovení z místa průrazu. Tím se vytvoří izolační plocha, která je napěťově odolná a neovlivní funkci zbylé části kondenzátoru. To je nazýváno samoregenerací. Během působení poruchy a po ní je kondenzátor plně funkční. Typická hodnota snížení kapacity vlivem průrazu a samoregenerace je dle [Kom07] cca 100 pF.

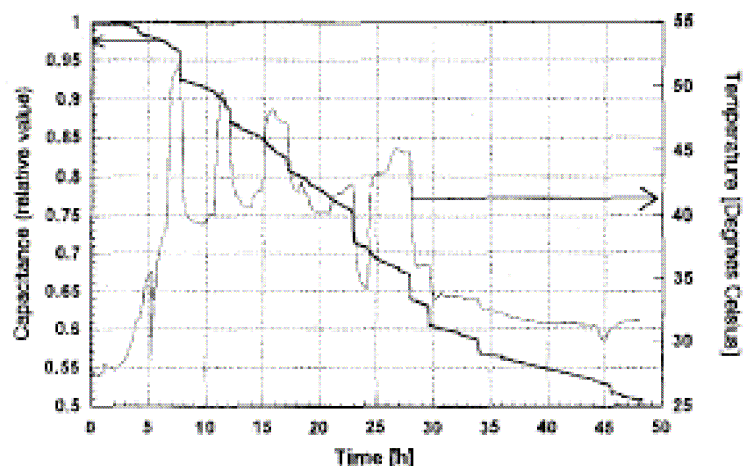
V případě sériové kompenzace, kde je u MKP kondenzátorů dle [App00]

akceptován pokles kapacity během celé životnosti kondenzátoru pouze o 5 %, by tak u kondenzátoru s kapacitou 4 μF , činil pokles vlivem jedné regenerace 0,0025 %, tzn., že k poklesu kapacity o 5 % dojde po cca 2 000 samoregeneračních průrazech.



Obrázek 2.29: Napěťový průraz v kondenzátoru [Kom07]

Znázornění postupného snižování kapacity samoregeneračními průrazy je uvedeno v [Mon99], viz obr. 2.30. Kondenzátor s nominálním napětím 250 V byl testován napětím s dvojnásobnou amplitudou základní harmonické plus 1,14 násobkem páté harmonické. Uveden je pokles kapacity v závislosti na čase při současném měření vnitřní teploty kondenzátoru. Na obrázku lze pozorovat oteplení před proražením až 25 °C. Průměrná hodnota oteplení je 13 °C. Při testech, kde byl kondenzátor zatížen pouze základní harmonickou, bylo oteplení pouze 3 °C. Literatura [Mon99] bohužel uvádí místo skutečné kapacity testovaného kondenzátoru pouze její relativní hodnotu, která je rovna 1. Efektivní a špičková hodnota testovacího napětí, jejichž velikost činila $V_{\text{rms}} = 575 \text{ V}$ a $V_{\text{peak}} = 1060 \text{ V}$, poukazují na značné přetížení testovaného kondenzátoru.

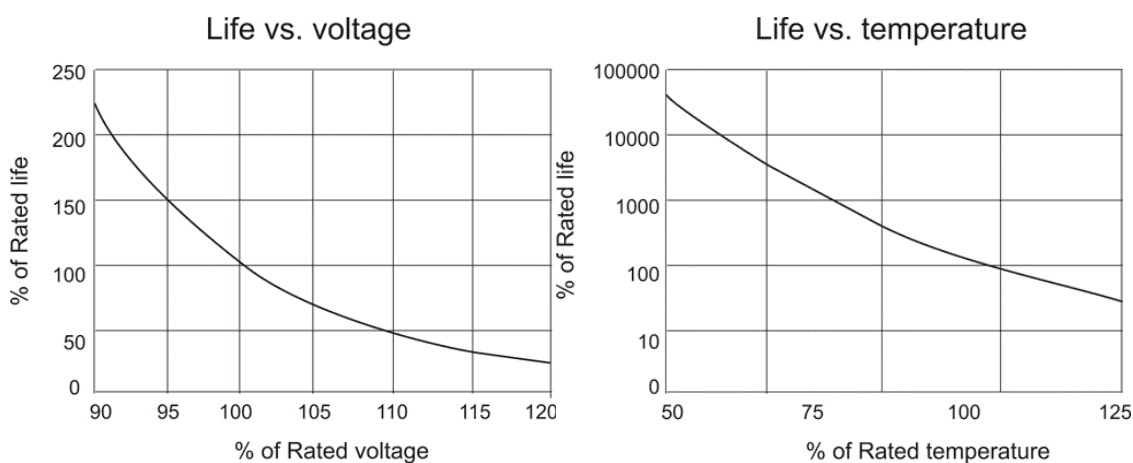


Obrázek 2.30: Průběh kapacity a vnitřní teploty kondenzátoru v závislosti na čase [Mon99]

Dle [Kom04] například zvýšení průměrné provozní teploty o 20 °C může způsobit osminásobné zkrácení životnosti kondenzátoru. Pro odhad vlivu teploty a pracovního napětí na životnost fóliových kondenzátorů, které pracují v obvodech střídavého proudu lze použít grafy 2.31. Výpočtová životnost kondenzátorů se uvádí pro jmenovité provozní podmínky. Jestliže jsou kondenzátory namáhány méně, než odpovídá jmenovitým podmínkám podle IEC 60831, je možno předpokládat delší životnost. Při výběru kondenzátoru je proto nutné zohlednit, v jakých provozních podmínkách bude kondenzátor pracovat. Pro světelné aplikace by proto měly být dle [App00] použity kondenzátory s těmito hodnotami:

- paralelní 250 V s maximální odchylkou kapacity $\pm 10\%$
- sériový 450 V s maximální odchylkou kapacity $\pm 4\%$.

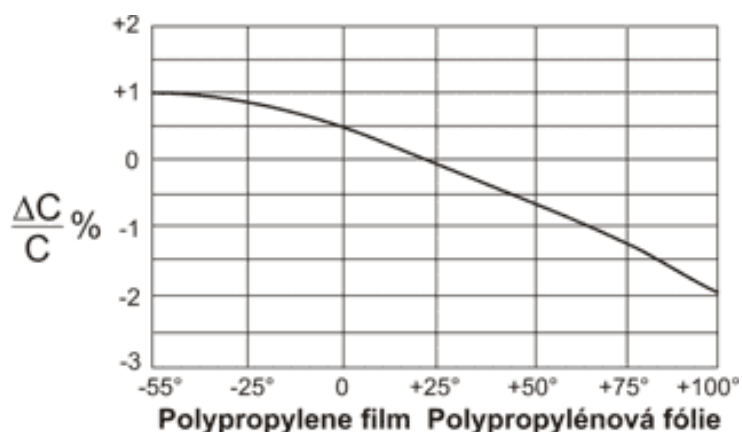
Rozsah pracovních teplot se standardně pohybuje od -25 °C do +85 °C nebo +100 °C.



Obrázek 2.31: Vliv teploty a pracovního napětí na životnost fóliových kondenzátorů [Eso10]

Dle výše uvedeného, při zvýšeném proudu dochází vlivem ztrát k nadměrnému vnitřnímu ohřevu kondenzátoru. O velikosti ztrát, které v kondenzátoru vznikají, rozhoduje především materiál dielektrika. Ztráty jsou vyjádřeny tzv. ztrátovým činitelem $\tan \delta$, což je poměr odporové a kapacitní složky impedance kondenzátoru. Ztrátový činitel je rovněž ovlivněn způsobem „skladování“, protože úhel δ působením teploty a vlhkosti roste.

Jak se mění kapacita vlivem vnitřní teploty kondenzátoru s polypropylenovou fólií, ukazuje graf na obrázku 2.32. Pokles kapacity souvisí s teplotní dilatací materiálu dielektrika.



Obrázek 2.32: Závislost kapacity na teplotě u kondenzátorů s polypropylenovou fólií [Eso10]

Výrobci kompenzačních kondenzátorů pro zářivková svítidla je několik. Příkladem mohou být firmy TESLA, UNICOMP, EPCOS, ITALFARAD nebo ZEZ SILKO. Většina kondenzátorů je dostupná s velkým množstvím typů připojení a instalačních možností a je vyráběna s plastovým nebo hliníkovým pouzdem. Kondenzátory bývají zároveň vybaveny pojistkou proti přetížení, tzv. přetlakovou pojistkou, která brání destrukci při přepětí nebo vyšších harmonických.

Bezpečnost při provozování kondenzátorů je zajištěna zmíněnou samoregenerační funkcí, přetlakovou pojistkou a dále integrovanými vybíjecími rezistory, které zajišťují bezpečné vybití kondenzátoru na 50 V do jedné minuty. Literatura [App00] však upozorňuje na speciální případy, kde, dle normy IEC 598-8.2.7, musí být úroveň napětí

dokonce 35 V.

Veškeré kondenzátory musí vyhovovat normám (ČSN) EN 61048 a (ČSN) EN 61049 a dle těchto norem jsou řazeny do určitých bezpečnostních tříd, třídy A nebo třídy B. Kondenzátorem třídy A je míněn samoregenerační paralelní kondenzátor, který nemusí nutně obsahovat přerušovací zařízení. Kondenzátor třídy B je samoregenerační kondenzátor používaný v sériových světelných obvodech nebo samoregenerační paralelní kondenzátor s přerušovacím zařízením.

Kondenzátory s technologií MKP („suché“) jsou vyrobeny z jednostranně pokovené PP fólie s velmi nízkými dielektrickými ztrátami a jedná se o provedení suché, bez olejové náplně. Jsou plněny nehořlavou pryskyřicí nebo inertním plynem – dusíkem. Impregnace se provádí ve vakuu, čímž jsou z vnitřku kondenzátoru odstraněny vzduch a vlhkost, a dochází tak k ochraně před oxidací elektrod a částečnými výboji.



Obrázek 2.33: Typy paralelních zářivkových kondenzátorů: zleva TC884, TL201, UNICOMP LCP0040022, ELEKTRONICON; 250V AC, 50/60Hz. [Kon03], [Kom06a], [Par09]

Tabulka 2.3: Souhrn základních vlastností kompenzačních kondenzátorů MKP používaných pro zářivková osvětlení

TYP KONDENZÁTORU	PROVEDENÍ	KOMPENZACE	TŘÍDA DLE NOREM	MAX. OBSAH HARMONICKÝCH [%]	MECHANICKÉ JISTICI ZAŘÍZENÍ	VYBÍJECÍ REZISTOR	PROVOZNÍ PODMÍNKY	JMENOVITÉ PROVOZNÍ NAPĚTÍ [V~]	ČINITEL ZTRÁT $\tan \delta \times 10^{-4}$ při 50Hz/1kHz			KAPACITA [μ F] ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$)
									<10 μ F	>10 μ F	>30 μ F	
TC 884	PLAST	PARALELNÍ	A	<8	NE	ANO	*	250	6/40 (12/80)	8/16 (16/160)	X/X	2÷80

TL 201	HLINÍK	PARALELNÍ	A	<8	NE	ANO	**	250	6/40 (12/80)	8/16 (16/160)	X/X	2÷40
TC 844	HLINÍK	PARALELNÍ	B	<12	ANO	NE	***	250	6/40	8/80	15/150	2,5÷70
TL 501	HLINÍK	SÉRIOVÁ	B	<12	ANO	NE	***	500	6/40			2÷10
DNA LCP	PLAST	PARALELNÍ	A	X	X	ANO	X	250	10/X			2÷70
DNA LCS	HLINÍK	SÉRIOVÁ	B	X	ANO	ANO	X	450	6/X			2÷10
E12	HLINÍK	PAR / SER	B	X	ANO	ANO	*	300	X/X			13,5

* v běžných provozních podmínkách

** v obtížnějších provozních podmínkách

*** v obtížných provozních (a zejména klimatických) podmínkách a tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na bezpečnost zařízení

X výrobce, popř. prodejce neuvádí

(x/x) činitel ztrát se liší dle provedení vývodů kondenzátorů - hodnota před lomítkem vždy odpovídá ztrátovému činiteli při 50 Hz a za lomítkem 1 kHz.

Příkladem MKP kondenzátorů od firmy TESLA jsou typy TC884, TL201, TC 844, TL501, dále typ LCP či LCS od firmy UNICOMP nebo DNA Central Europe, popř. od firmy ELECTRONICON typy E12, E33. Základní vlastnosti uvedených typů shrnuje tabulka 2.3. Bližší informace uvádí např. [Kon03], [Kom06a],[Par09].

Kondenzátory od firmy TESLA, uvedené v tabulce, nejsou dle [Kon03] určeny pro centrální kompenzaci a kompenzaci zařízení, která produkují vysoký obsah harmonických kmitočtů. Obecně vede obsah harmonických ke zvýšení proudu kondenzátoru, protože jeho impedance klesá se zvyšujícím se kmitočtem. Řešením může být instalace kondenzátorů s tlumivkami (chráněné kompenzace), čímž se zatlumí rezonanční obvod a instalace má také částečný filtrační efekt - snižuje úroveň zkreslení v síti. Dle [Kom10] se doporučuje všude tam, kde podíl zařízení generujících vyšší harmonické je vyšší než 20 % celkové kompenzované zátěže. Pro odstranění vyššího procenta harmonických ze sítě se užívají filtrační obvody. Kondenzátor je v chráněných kompenzacích vystaven vyššímu napětí, než je napětí sítě, což je způsobeno sériovým zapojením tlumivky a kondenzátoru.

U kondenzátoru MKV („mokrý“), tvoří elektrody tenký polypropylénový film s oboustranně pokovenou papírovou vrstvou. Tato konstrukce přispívá k dosažení mimořádně nízkých ztrát a nejvyšší odolnosti proti impulsnímu proudu. Celý systém je impregnován minerálním olejem, což umožňuje výjimečně dobrý odvod tepla z elektrod kondenzátoru přes papírovou vrstvu na povrch hliníkového pouzdra, čímž je zabráněno vznikaní horkých míst na elektrodách. Impregnant, který brání korozi svítka, musí být ekologicky nezávadný. Původně používaný impregnant Delor na bázi polychlorovaných

bifenylů byl klasifikován jako karcinogenní a v ČR musí být, dle [Kom06b] a v souladu se zákonem 185/2001 Sb., takové kompenzace zlikvidovány do konce roku 2010. MKV kondenzátory jsou vhodné pro vyšší výkonové zatížení a vyšší okolní teplotu až do +70 °C. Jejich životnost dosahuje řádově 150 000 hodin a maximální odolnost proti impulsnímu proudu je 300 násobek proudu jmenovitého. Maximální počet sepnutí za rok je uváděn v literatuře [Kom07] okolo 5 000 a odpovídá normě IEC 60831.



Obrázek 2.34: MKV kondenzátor od firmy EPCOS [Kom07]

V současnosti se kondenzátory vyrábí převážně v systému MKP. MKV kondenzátory se již vyrábějí pouze výjimečně, pro speciální projekty. Jedná se například o projekty, kdy dochází ke vzniku špiček v síťovém napětí nebo častému spínání, vysoké úrovni vlhkosti či kondenzace. Kondenzátory v suchém provedení nejsou do těchto aplikací vhodné z důvodu jejich větší citlivosti na napětové špičky.

Kompenzační kondenzátory by měly být jištěny pojistkami s pomalou vypínací charakteristikou (gG). Průřez vodičů by měl být dimenzován alespoň na $1,6 \div 1,8$ násobek jmenovitého proudu kondenzátoru. Doporučené průřezy vodičů a dimenzování pojistek uvádí například literatura [Kom10].

3 Měření parametrů komponent obvodu svítidla, náhradní obvody pro stavy startu

Před rozborem startu zářivkového svítidla v kapitole 4 je nutné znát ustálené hodnoty obvodových veličin v jednotlivých stavech svítidla během procesu zapalování zářivky. Zapalovací proces je v této práci popisován stavovým diagramem. Diagram obsahuje základní stavy: ohřev startéru, žhavení elektrod, svícení atd.

Jednotlivé stavy ve stavovém diagramu lze popsat náhradními obvody, jejichž parametry lze vypočítat. Výsledky z tohoto analytického postupu budou použity k nastavení mezí algoritmu, automaticky rozpoznávajícího jednotlivé stavy. Při zpracování dat z více reálných zářivkových svítidel musíme navíc počítat s rozptylem parametrů prvků. Proto si můžeme dovolit zjednodušené řešení úlohy linearizací jednotlivých obvodových prvků. Stavy svítidla můžeme pak definovat pouze komplexní impedancí. Model stavů tak může být popsán rovnicí

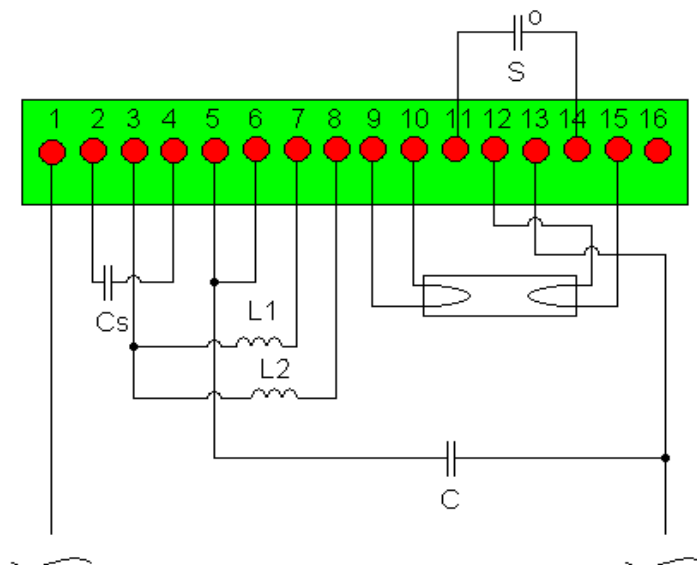
$$\mathbf{Z} = A \cdot e^{j\varphi} + \sigma, \quad (3.1)$$

kde \mathbf{Z} je impedance daného stavu,
 A je amplituda,
 φ je fázový posun,
 σ jsou parazitní vlivy.

Náhradní obvody jednotlivých stavů včetně určení jejich komplexních impedancí jsou popsány v kapitole 4.

Pro výpočet komplexních impedancí a následného určení výsledných konstant impedancí A a φ v jednotlivých provozních stavech zářivkového svítidla je třeba znát parametry náhradního obvodu svítidla.

Pro tento experiment byla použita svítidla jak s paralelní, tak i sériovou kompenzací účinníku. Měření byla provedena na modelu osvětlovací sítě se 24 svítidly zapojenými podle obr. 3.1. Jednotlivá zapojení: paralelní kompenzace (CpL1, CpL2), sériová kompenzace (CsL1, CsL2) a bez kompenzace (L1) byla měřena s následujícím osazením:



Obrázek 3.1: Schéma zapojení jednoho svítidla v modelu osvětlovací sítě

Kondenzátor (C)	DNA LCP 0045015	4,5 $\mu\text{F} \pm 10 \%$	pro paralelní kompenzaci
Kondenzátor (C_s)	CA 440	3,4 $\mu\text{F} \pm 5 \%$	pro sériovou kompenzaci

pro obě kompenzace:

Tlumivka ($L1$)	DFT 5336	kategorie C
Tlumivka ($L2$)	L36TL2230	kategorie B
Trubice	Philips Master TL-D 36W/840	$P = 36 \text{ W}$; $U = 103 \text{ V}$; $I = 0,44 \text{ A}$
Startér (S)	Philips S10	

Měření byla tedy provedena se dvěma typy tlumivek v různých kategoriích účinnosti (C, B).

3.1 Kapacita kondenzátoru

Dle výše uvedeného v kapitole 2.6 je velikost kapacity kondenzátoru udávána výrobcem. Protože se však udávaná hodnota pohybuje v jisté toleranci, pak v případě potřeby znát přesnou hodnotu kapacity, je nutné provést měření⁷.

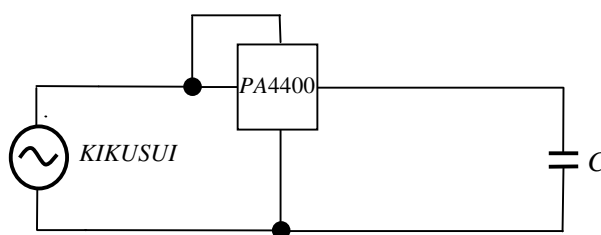
V tomto případě tedy byla hodnota kapacity kondenzátoru vypočtena z naměřených hodnot U , I , P a Q na analyzátoru sítě AV Power PA 4400. K napájení byl použit

⁷ Namísto měření multimetrem je nejlepší určit kapacitu kondenzátoru prostřednictvím analyzátoru. Důvodem je její měření za provozních podmínek.

výkonový zdroj KIKUSUI PCR 2000LA a měřilo se na modelu osvětlovací sítě. Změřeny byly kondenzátory u 12 svítidel. Jednotlivé naměřené i vypočtené hodnoty pro oba typy kompenzace jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2 v příloze 1. Hodnota kapacity kondenzátoru vyšla v průměru

$4,39 \pm 0,05 \mu\text{F}$	pro paralelní kompenzaci a
$3,478 \pm 0,009 \mu\text{F}$	pro sériovou kompenzaci.

Schéma zapojení použité pro toto měření:



Obrázek 3.2: Schéma zapojení pro měření kapacity kondenzátoru

3.2 Odpor vláken

Odpor vláken zářivkové trubice $R_{VLÁKEN}$ byl změřen dvojím způsobem. Odpor chladného vlákna při pokojové teplotě multimetrem a Ohmovou metodou při úrovni žhavicího proudu:

multimetrem

$$R_{VLÁKEN} = 2 \cdot 2,5 = 5 \Omega$$

Ohmovou metodou pro obě vlákna:

$$U(1) = 7,5 \text{ V}; \quad I(1) = 0,53 \text{ A} \quad \rightarrow \quad R_{VLÁKEN} = 2 \cdot \frac{U}{I} = 28 \Omega$$

$$U(2) = 6,7 \text{ V}; \quad I(2) = 0,53 \text{ A} \quad \rightarrow \quad R_{VLÁKEN} = 2 \cdot \frac{U}{I} = 25 \Omega$$

3.3 Odpor startéru

Odpor startéru určuje jeho doutnavý výboj. Přibližná hodnota byla určena ze zápalného napětí startéru a proudu jím procházejícím. Při měření bylo zvyšováno napětí na startéru, a jakmile došlo k zažehnutí doutnavého výboje ve startéru, bylo odečteno zápalné napětí a proud. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Měření odporu startéru

NAMĚŘENÉ HODNOTY		VYPOČTENÁ HODNOTA
U [V]	I [mA]	R _{STARTÉRU} [kΩ]
160	0,25	640
152	0,31	490
170	0,32	531
160	0,29	551
170	0,40	425
175	0,35	500

Vypočtená průměrná hodnota odporu startéru činí $R_{\text{STARTÉRU}} = 520 \pm 30 \text{ k}\Omega$.

3.4 Indukčnost a odpor tlumivky

Tyto hodnoty lze vypočítat z naměřených hodnot U, I, P a Q na analyzátoru sítě, viz tabulka 3.2. Při měření se zapojí do série s tlumivkou reostat, kterým se nastaví jmenovitý proud protékající tlumivkou.

Tabulka 3.2: Měření indukčnosti a odporu tlumivky

NAMĚŘENÉ HODNOTY				VYPOČTENÉ HODNOTY				
U [V]	I [A]	P [W]	Q [Var]	cos φ	φ [°]	X _L [Ω]	L [H]	R [Ω]
72,5	0,167	1,48	12,0	0,122	82,9	429	1,36	52,9
72,8	0,169	1,50	12,1	0,122	82,9	427	1,36	52,8
73,0	0,169	1,52	12,1	0,123	82,9	427	1,36	53,4
72,6	0,168	1,51	12,1	0,124	82,9	427	1,36	53,3
72,6	0,168	1,52	12,1	0,124	82,8	425	1,35	53,5
72,8	0,168	1,48	12,1	0,121	83,0	429	1,36	52,5
Průměry:						428	1,36	53,10

Pro výpočty byly použity vztahy

$$X_L = \frac{Q}{I^2}, \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad R = \frac{P}{I^2}. \quad (3.2)$$

3.5 Náhradní obvod zářivkové trubice

Protože odběr výboje zářivky má značný induktivní charakter, jak je patrné z níže uvedeného výpočtu, lze výboj zářivky nahradit ideálním sériovým zapojením RL. Zářivce Philips Master TL-D 36 W / 840, použité v tomto experimentu, odpovídají katalogové hodnoty P = 36 W, U = 103 V a I = 0,44 A, ze kterých lze určit odpor a indukčnost zářivkového výboje následovně:

$$R_{\text{LAMP}} = \frac{P}{I^2} = \frac{36}{0,44^2} = 186 \, \Omega, \quad (3.3)$$

$$S_{\text{LAMP}} = U \cdot I = 103 \cdot 0,44 = 45,3 \, \text{VA}, \quad (3.4)$$

$$Q_{\text{LAMP}} = \sqrt{S_{\text{LAMP}}^2 - P^2} = 27,5 \, \text{VAr}, \quad (3.5)$$

$$X_L = \frac{Q}{I^2} = 142 \, \Omega, \quad (3.6)$$

$$L_{\text{LAMP}} = \frac{X_L}{\omega} = 0,45 \, \text{H}. \quad (3.7)$$

3.6 Výsledné impedance náhradních obvodů v jednotlivých stavech

Výpočet impedancí v jednotlivých stavech je uveden v příloze 8.2. V této podkapitole jsou uvedeny pouze výsledky analýzy.

K výpočtu komplexních impedancí dle vzorců (8.1) až (8.15), viz příloha 8.2, byly použity průměrné hodnoty parametrů kondenzátoru uvedené v tabulkách 8.1 a 8.2 přílohy 8.1 a z hodnot tlumivky, vláken, startéru a zářivky v tabulkách 8.3 až 8.5 v příloze 8.1.

Tabulka 3.3: Impedance svítidel v různých stavech

PROVOZNÍ STAV	Paralelní kompenzace CpL1			bez kompenzace L1			Sériová kompenzace CsL1		
	Z (Ω)	φ (°)	I (A)	Z (Ω)	φ (°)	I (A)	Z (Ω)	φ (°)	I (A)
OHŘEV STARTÉRU	730	-87,4	0,32	16300	2,6	0,014	16300	-0,6	0,014
ŽHAVENÍ	820	68,3	0,28	392	79,8	0,59	535	-82,5	0,43
ODSKOK STARTÉRU	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVÍCENÍ	1520	26,1	0,15	565	70,4	0,41	428	-63,8	0,54
VYPNUTÍ	∞	-	0	∞	-	0	∞	-	0

PROVOZNÍ STAV	DUO zapojení CsL1 + L1		
	Z (Ω)	φ (°)	I (A)
OHŘEV STARTÉRU	8120	0,97	0,028
ŽHAVENÍ	1050	43,5	0,22
ODSKOK STARTÉRU	-	-	-
SVÍCENÍ	594	-14,6	0,39
VYPNUTÍ	∞	-	0

4 Měření startů zářivkového tělesa

Měření byla prováděna na modelu osvětlovací sítě na Ústavu mechatroniky a technické informatiky Technické univerzity v Liberci. Model je tvořen šesti osvětlovacími tělesy a umožňuje snadno a rychle překonfigurovat zapojení osvětlovacího tělesa, např. změnit typ kompenzace účinníku. Jedno těleso přitom sestává ze čtyř zářivek, panelu osazeného výzbrojí elektromagnetického předřadníků v různých variantách a panelu s elektronickými předřadníky. Panely předřadníků obsahují konektor pro měření obvodových veličin svítidla, který zároveň slouží pro konfiguraci zapojení předřadníku, viz obr. 3.1. Fotografie modelu je na obr. 7.1.



Obrázek 4.1: Model osvětlovací sítě

K napájení byl použit programovatelný výkonový zdroj 2 kVA, KIKUSUI PCR 2000LA, který zajistil čistě harmonické testovací napájení 50 Hz se zanedbatelnými odchylkami. Testy byly prováděny pro jmenovité napětí 230 V a odchylky $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$. Celkem tak bylo měřeno při pěti různých napětích v zapojení s DUO a s paralelní kompenzací účinníku, s tlumivkami L_1 a L_2 a bez kompenzace s tlumivkou L_1 .

Pro statistické vyhodnocení se měřilo ve dvou výběrových souborech: a) na jedné zářivce s počtem měření 50 pro stejné podmínky a b) na 12 zářivkách, z nichž na každé proběhlo 10 měření při stejných podmínkách.

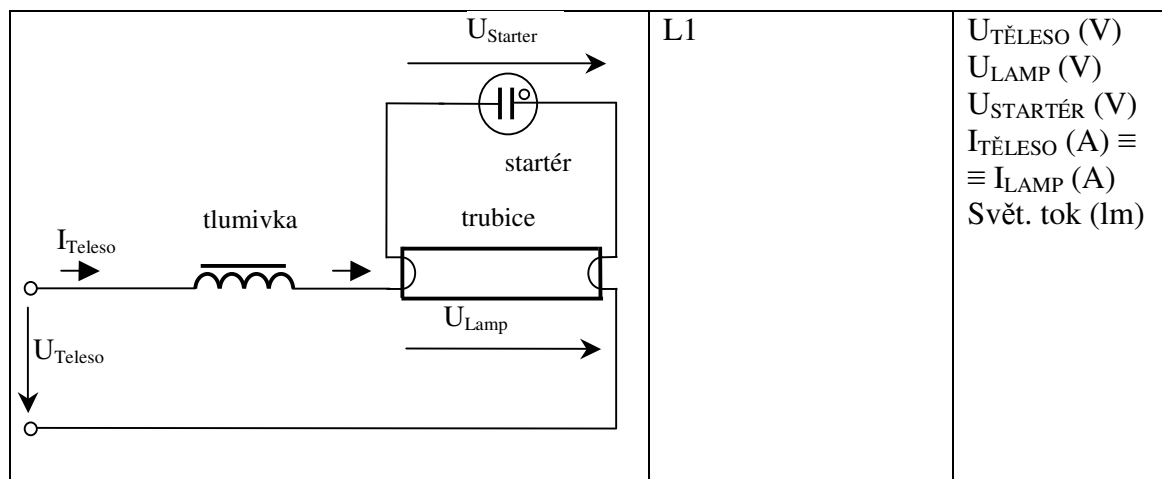
To znamená, že v případě výběrového souboru jedné zářivky ad a) bylo provedeno 1250 měření a v případě souboru s 12 zářivkami ad b) 3000 měření.

Z každého měření byly několik sekund po přivedení napájecího napětí zaznamenány oscilogramy obvodových veličin a intenzity světelného toku trubice. Realizace měření proběhla na 18 kanálovém přístroji EMU-2 se vzorkovací frekvencí 12,8 kHz, ovládaným skriptem v jazyce Delphi.

Měření se realizovalo na konfiguracích, uvedených v tabulce 4.1. Napětí byla změřena přímo napěťovými vstupy měřicí ústředny EMU-2. Pro měření proudu tělesa $I_{\text{TĚLESO}}$ a proudu zářivky I_{LAMP} se použily snímače proudu s kompenzovanou Hallovou sondou LEM PR30. V obvodu se sériovou kompenzací účinníku a v obvodu bez kompenzace se oba proudy rovnají. Měřena byla také intenzita světelného toku pomocí sestavených čidel.

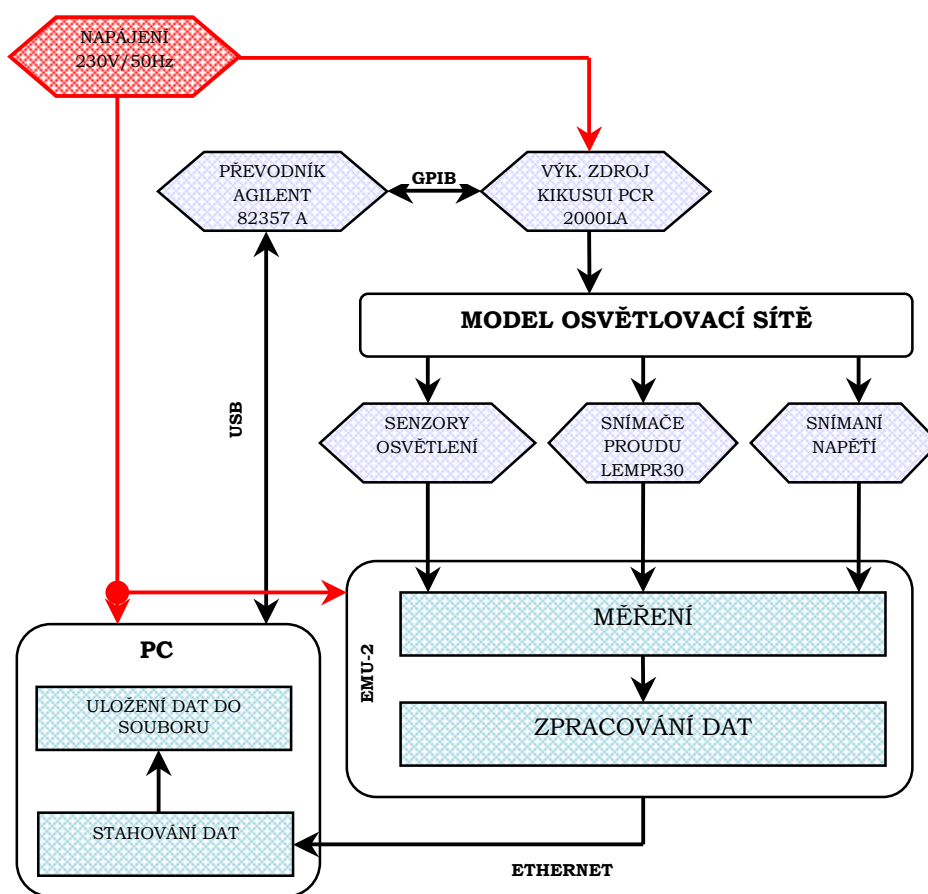
Tabulka 4.1: Topologie svítidel při jednotlivých měřeních

ZAPOJENÍ	OZNAČENÍ/VARIANTY	MĚŘENÉ VELIČINY
	CpL1 CpL2	$U_{\text{TĚLESO}}$ (V) U_{LAMP} (V) $U_{\text{STARTÉR}}$ (V) $I_{\text{TĚLESO}}$ (A) I_{LAMP} (A) Svět. tok (lm)
	CsL1 CsL2	$U_{\text{TĚLESO}}$ (V) U_{LAMP} (V) $U_{\text{STARTÉR}}$ (V) $I_{\text{TĚLESO}}$ (A) \equiv $\equiv I_{\text{LAMP}}$ (A) Svět. tok (lm)



Obrázek 4.2: Měřicí pracoviště – EMU-2 nahoře, výkonový zdroj PRC 2000LA dole

Základem čidel intenzity osvětlení je snímač SFH 5711 s logaritmickým proudovým výstupem, který má integrován spektrální filtr s citlivostí odpovídající lidskému oku. Snímač byl umístěn v držáku tvarovaném podle zářivkové trubice T8 ve vzdálenosti 5 mm od povrchu zářivky. Díky neměnnému geometrickému uspořádání odpovídá intenzita osvětlení přímo úměrně světelnému toku generovanému zářivkou. Výstup snímače byl zatížen rezistorem 56 kΩ a impedančně oddělen zesilovačem rail-rail MCP 601. Přesnost snímače byla ověřena porovnáním s luxmetrem CA811. Chyba v celém rozsahu nepřesahovala 5 %. Výhodou snímače je spektrální citlivost odpovídající oku a rychlost odezvy, kde výrobce garantuje zpoždění menší než 0,1 ms při dosažení 90 % výstupní hodnoty [Hig06].

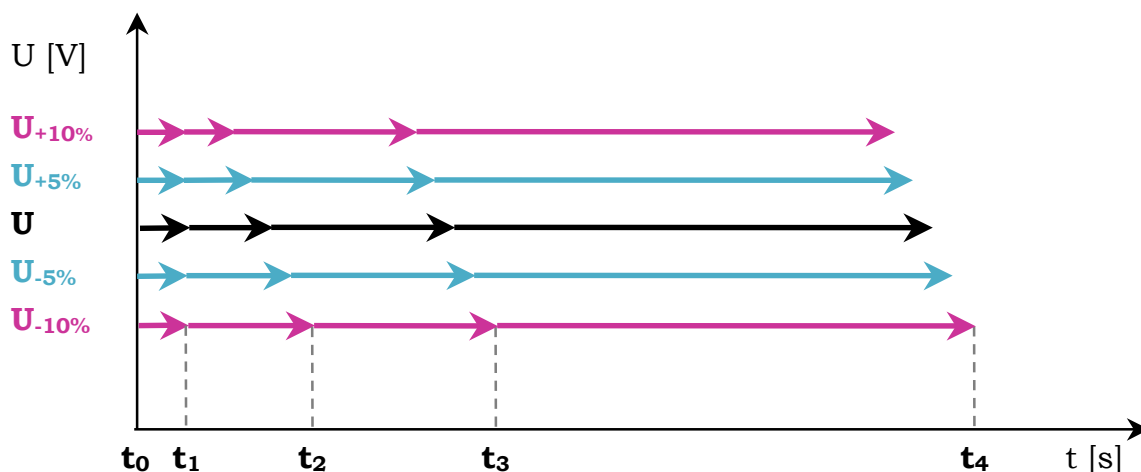


Obrázek 4.3: Blokový diagram popisovaného měření

Seznam přístrojů a pomůcek použitých při měření:

1. Výkonový zdroj: KIKUSUI PCR 2000LA
2. USB GPIB převodník: AGILENT 82357A
3. Model osvětlovací sítě: nové trubice Philips Master TL-D 36W/840
opotřebované trubice PILA LF 36W/33
4. AČ převodník: EMU-2 se vzorkovací frekvencí 12,8 kHz
5. PC
6. Snímače proudu: LEM PR30
7. Senzory osvětlení: OSRAM SFH5711 + operační zesilovač MCP601

Měření probíhala plně automatizovaně z ovládací aplikace naprogramované v Borland Delphi. Opakovaná měření probíhala v sekvenci. Časový průběh jednoho měření ze sekvence je uveden na obrázku 4.4. Měření byla provedena pro napájecí napětí: $U = 230 \text{ V}$; $U_{-5\%} = 218,5 \text{ V}$; $U_{-10\%} = 207 \text{ V}$; $U_{+5\%} = 241,5 \text{ V}$; $U_{+10\%} = 253 \text{ V}$.



Obrázek 4.4: Časový průběh měření

Popis jednotlivých časových úseků měření

- t_0** začátek měření měřicí ústředny EMU-2 (měří přibližně 3 periody bez napájecího napětí)
- t_1** start zdroje KIKUSUI, dochází k napájení modelu osvětlovací sítě
- $t_1 \div t_2$** rozsvícení zářivek; doba rozsvícení je závislá na napájecím napětí z důvodu úspory místa při ukládání dat a omezení zahřátí trubice, přičemž s větším napětím dochází k rychlejšímu zápalu zářivky
- t_2** konec měření, měřicí jednotka EMU-2 začíná posílat data do PC
- $t_2 \div t_3$** stahování a ukládání dat
- t_3** ukončení stahování a ukládání dat
- $t_3 \div t_4$** vložený časový úsek pro vychladnutí trubice, k této době se přidává i doba začátku měření $t_0 \div t_1$ a doba stahování dat z ústředny $t_2 \div t_3$
- t_4** vypnutí, popřípadě opakování cyklu

Např. při měření s napětí zdroje 230 V byly typické hodnoty časů: $t_0 = 0$ s; $t_1 = 0,06$ s; $t_2 = 9,4$ s; $t_3 = 19,4$ s; $t_4 = 120$ s.

4.1 Skript v jazyce MATLAB

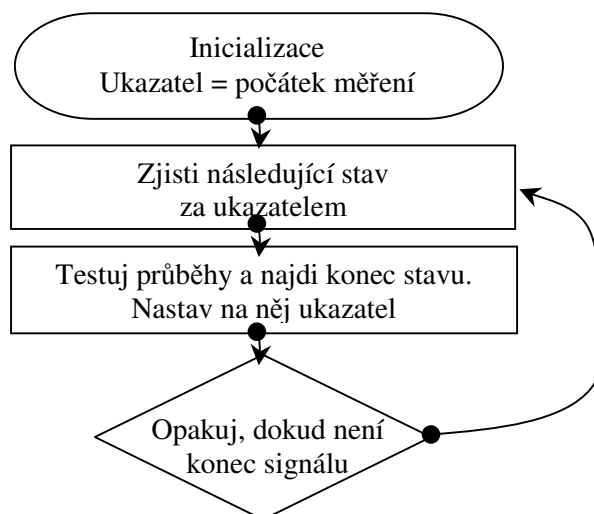
Tento skript byl vytvořen pro automatickou detekci přechodů mezi jednotlivými stavy a vyhledává jednotlivé stavy.

Původně sestavený program publikovaný v [Nov06] byl určen pro detekci přechodů pouze pro obvody s paralelní kompenzací účinníku. Aby mohl program pracovat bezchybně i se zapojeními se sériovou kompenzací a při rozptylu parametrů svítidel, byly v programu kompletně zobecněny podmínky detekce stavů a zároveň došlo k jeho doladění pro využití signálů z čidel světelného toku.

Program pracuje se zaznamenanými oscilogramy z rozběhu zářivkového svítidla tak, že jimi postupně prochází od začátku do konce a vyhledává jednotlivé stavy. Aktuální pozice v oscilogramu je dána ukazatelem, který se při průchodu oscilogramem postupně posouvá na konce jednotlivých stavů. Ukazatel je umístěn na časové ose a od jeho pozice skript určuje následující stav svítidla z analýzy průběhů (oscilogramů) obvodových veličin a intenzity světelného toku. Testy jsou realizovány porovnáním středních hodnot usměrněných signálů s limitními hodnotami. Testy jsou prováděny na různě dlouhých datových úsecích. Typicky odpovídají době trvání $1/8$, $1/4$, $1/2$, 1 a více period napájecího napětí. Testování signálu v několika úsecích periody bylo zvoleno z důvodu robustnosti algoritmu, protože přechody mezi jednotlivými stavy bývají poznamenány přechodovými ději. Střední hodnoty jsou, na rozdíl od efektivních hodnot, vypovídající i při zpracování signálu s necelou délkou periody. Při splnění limitu je příslušný stav ohodnocen bodovým skóre. Na konci všech testů je vybrán stav s nejvyšším bodovým ohodnocením a považován za stav následující.

Hlavní část skriptu je umístěna v souboru „T_1zarivka.m“, kde jsou hlavní smyčky procházející naměřené soubory podle zapojení kompenzace obvodu (CpL1, CpL2, CsL1, CsL2, L1) a podle napájecích napětí a jsou zde ukládány soubory s vyhodnocenými výsledky. Uvnitř smyček je sestaven příslušný název souboru se změřenými daty, který je zaveden do paměti a poté je spuštěn podprogram „t_zari.m“. V tomto podprogramu jsou zobrazeny naměřené oscilogramy a jsou oddělena data trubic, protože v každém souboru z měření jsou uložena data od dvou současně měřených zářivkových trubic. Vlastní vyhodnocení stavového diagramu provádí podprogram „t_stateParser.m“. Stručný vývojový diagram podprogramu „t_stateParser.m“ je znázorněn na obrázku 4.5. Nalezené stavy se vyznačují grafickými značkami do zobrazeného oscilogramu pro kontrolu uživatelem. Funkčnost programu byla pomocí těchto značek rozsáhle kontrolována na stovkách měření pro všechna

zapojení předřadníku a všechna napájecí napětí.



Obrázek 4.5: Stručný vývojový diagram vyhodnocovacího programu

Vlastní stavy jsou rozpoznávány v podprogramu „tf_CheckNextState.m“. Pro stav „**není napájení**“, který je rozpoznán podle nízkého napětí na tělese, dochází k testování přes 1, 1/4 a 5 period s ohodnocením 500, 250 a 600 body. Jednotlivé vztahy pro detekci stavu vypadají následovně:

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |U_{\text{teleso}}| < 5 \text{ V} \rightarrow 500 \text{ bodů} \quad (4.1)$$

$$\frac{4}{T} \int_{t_0+\frac{T}{4}}^{t_0+\frac{T}{2}} |U_{\text{teleso}}| < 5 \text{ V} \rightarrow 250 \text{ bodů} \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{5 \cdot T} \int_{t_0}^{t_0+5 \cdot T} |U_{\text{teleso}}| < 5 \text{ V} \rightarrow 600 \text{ bodů} \quad (4.3)$$

Nenulová limitní hodnota je zde uvedena z důvodu necitlivosti k šumu na signálu. Vysoké bodové hodnoty jsou zde proto, že tento stav je definován jednoznačně.

Stav „**ohřev startéru**“ je rozpoznán podle napětí na startéru. Zápalné napětí startéru se pohybuje okolo 60 V, přičemž tato hodnota představuje střední hodnotu usměrněného napětí. Nicméně, do testovacích podmínek byla zahrnuta hodnota o 10 V vyšší, tedy 70 V, kde zmíněných 10 V je považováno za rezervu. Dochází zde k testování přes 1, 1/4 a 1/8 periody s ohodnocením 6, 4 a 2 body. Jednotlivé vztahy pro detekci stavu vypadají následovně:

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |U_{\text{starter}}| > 70 \text{ V} \rightarrow 6 \text{ bodů} \quad (4.4)$$

$$\frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{4}} |U_{\text{starter}}| > 70 \text{ V} \rightarrow 4 \text{ body} \quad (4.5)$$

$$\frac{8}{T} \int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{8}} |U_{\text{starter}}| > 70 \text{ V} \rightarrow 2 \text{ body} \quad (4.6)$$

Bodové hodnoty jsou záměrně malé, protože tyto podmínky jsou často vyhodnoceny při přechodových dějích. Často k tomu dochází při nestabilním zapálení výboje zářivky. V takovém případě překoná bodové skóre skutečně platný stav, např. svícení.

Stav „**žhavení vláken trubice**“ se rozpozná jednoduše podle teoreticky nulového napětí na kontaktech sepnutého startéru a proudem protékajícím přes vlákna startéru. Mezní hodnota napětí na startéru byla z důvodu potlačení šumu nastavena na 4 V. Test je opět prováděn na 1/8, 1/4, 1 a 5 periodách. Přitom je, u krátkých testů (1/8 a 1/4 periody), začátek testu posunut pro přeskočení přechodových dějů. V ojedinělých případech s několika přechody za sebou, může docházet k nespolehlivosti tohoto testu, a proto byly detekční podmínky doplněny o test velikosti žhavicího proudu. Z teoretického rozboru, viz kapitola 3 a příloha 2, je vidět, že žhavicí proud elektrodami je cca 0,6 A u paralelní a 0,43 A u sériové kompenzace účinníku. Limitní hodnotou byl zvolen proud 0,3 A. Protože při svícení prochází zářivkou proud nevýrazně se lišící od žhavicího proudu, je test velikosti žhavicího proudu doplňkový a má malé bodové hodnoty. Jednotlivé vztahy pro detekci stavu vypadají následovně:

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |U_{\text{starter}}| < 4 \text{ V} \rightarrow 50 \text{ bodů} \quad (4.7)$$

$$\frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{4}} |U_{\text{starter}}| < 4 \text{ V} \rightarrow 30 \text{ bodů} \quad (4.8)$$

$$\frac{4}{T} \int_{t_0+t_s}^{t_0+t_s+\frac{T}{4}} |U_{\text{starter}}| < 4 \text{ V} \rightarrow 30 \text{ bodů} \quad (4.9)$$

$$\frac{4}{T} \int_{t_0 + \frac{T}{8}}^{t_0 + \frac{T}{4}} |U_{\text{starter}}| < 4 \text{ V} \rightarrow 30 \text{ bodů} \quad (4.10)$$

$$\frac{1}{5 \cdot T} \int_{t_0}^{t_0 + 5 \cdot T} |U_{\text{starter}}| < 4 \text{ V} \rightarrow 20 \text{ bodů} \quad (4.11)$$

$$\frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{4}} |i_{\text{lamp}}| > 0,3 \text{ A} \rightarrow 2 \text{ body} \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} |i_{\text{lamp}}| > 0,3 \text{ A} \rightarrow 2 \text{ body} \quad (4.13)$$

Pro detekci stavu „svícení“ se v původní verzi algoritmu používalo několika testů najednou, detekce byla nejproblematictější. Často je i pro člověka obtížné z obvodových veličin odlišit, kdy se ještě jedná o svícení a kdy už výboj nehoří a jedná se tak o ohřev startéru. Jednoznačnou odpověď dají pouze senzory intenzity osvětlení. Původně sestavený algoritmus pro detekci tohoto stavu vycházel z následujících tří podmínek

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{8}} |u_{\text{lamp}}| > 50 \text{ V} \rightarrow 2 \text{ body} \quad (4.14)$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{8}} |U_{\text{teleso}} - U_{\text{starter}}| > 50 \text{ V} \rightarrow 2 \text{ body} \quad (4.15)$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_0 + \frac{T}{8}}^{t_0 + \frac{T}{4}} |U_{\text{starter}}| > 4 \text{ V} \rightarrow 2 \text{ body}, \quad (4.16)$$

přičemž splnění všech podmínek najednou bylo ohodnoceno přidáním dalších 41 bodů. Rovnice (4.14) sledovala velikost napětí výboje a limit byl závislý na délce testované trubice. Rovnice (4.15) testovala úbytek napětí na předřadníku, který odpovídal průchodu proudu předřadníkem při žhavení nebo svícení a rovnice (4.16) vylučovala stav svícení při sepnutí startéru.

Nový algoritmus detekce svícení se zcela liší od původního a výhradně používá podmínky založené na intenzitě osvětlení. Nastavení je zaměřeno na citlivé zachycení nepovedeného zápalu trubice, kdy je výboj skutečně zažehnut, ale v krátké době (typicky do 1/8 periody) zaniká.

$$\frac{8}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{8}} |E| > 1000 \text{ lx} \rightarrow 40 \text{ bodů} \quad (4.17)$$

$$\frac{8}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{8}} |E| > 5000 \text{ lx} \rightarrow 30 \text{ bodů} \quad (4.18)$$

$$\frac{8}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{8}} |E| > 10000 \text{ lx} \rightarrow 60 \text{ bodů} \quad (4.19)$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} |E| > 5000 \text{ lx} \rightarrow 50 \text{ bodů} \quad (4.20)$$

$$\frac{8}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{8}} |E| > 200 \text{ lx} \rightarrow 15 \text{ bodů} \quad (4.21)$$

Stav „**nárůst napětí před zapálením**“ byl zařazen do programu po obtížích s detekcí zapálení zářivky při DUO, resp. sériové, kompenzaci, viz stavový diagram v kapitole 4.2. Obtíže nastaly s rozpoznáním stavu „svícení“ od stavu „ohřev startéru“. U sériové kompenzace po rozpojení kontaktu startéru narůstá napětí na výboji díky kondenzátoru postupně až k proražení výboje zářivkou. Algoritmus bez tohoto stavu vyhodnotil tento případ jako stav ohřev startéru. Přestože zároveň ohřev startéru probíhá, z principu o něj nejde. Podmínky pro vyhodnocení tohoto stavu jsou komplikovanější a obsahují logické součiny. První část identifikuje, že nedošlo k zažehnutí výboje těsně po rozepnutí kontaktů startéru. Druhá část logického součinu testuje velikost proudu, která je zaručeně menší než žhavicí proud. Konečně třetí část sleduje, zda s časovým zpožděním došlo k zapálení výboje. K vyhodnocení těchto podmínek dochází pouze v případě sériové kompenzace a v případě, že předchozím stavem bylo žhavení.

$$\frac{16}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{16}} |E| < 200 \text{ lx} \quad \wedge \quad \frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{4}} |i_{\text{lamp}}| < 0,3 \text{ A} \quad \wedge \quad \frac{8}{T} \int_{t_0 + \frac{T}{16}}^{t_0 + \frac{3T}{16}} |E| > 200 \text{ lx} \rightarrow 200 \text{ bodů} \quad (4.22)$$

$$\frac{16}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{16}} |E| < 200 \text{ lx} \quad \wedge \quad \frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{4}} |i_{\text{lamp}}| < 0,3 \text{ A} \quad \wedge \quad \frac{8}{T} \int_{t_0 + \frac{T}{8}}^{t_0 + \frac{T}{4}} |E| > 200 \text{ lx} \rightarrow 250 \text{ bodů} \quad (4.23)$$

$$\frac{16}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{16}} |E| < 200 \text{ lx} \quad \wedge \quad \frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{4}} |i_{\text{lamp}}| < 0,3 \text{ A} \quad \wedge \quad \frac{8}{T} \int_{t_0 + \frac{5 \cdot T}{16}}^{t_0 + \frac{7 \cdot T}{16}} |E| > 200 \text{ lx} \rightarrow 250 \text{ bodů} \quad (4.24)$$

$$\frac{16}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{16}} |E| < 200 \text{ lx} \quad \wedge \quad \frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{4}} |i_{\text{lamp}}| < 0,3 \text{ A} \quad \wedge \quad \frac{8}{T} \int_{t_0 + \frac{3 \cdot T}{8}}^{t_0 + \frac{T}{2}} |E| > 200 \text{ lx} \rightarrow 250 \text{ bodů} \quad (4.25)$$

$$\frac{16}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{16}} |E| < 200 \text{ lx} \quad \wedge \quad \frac{4}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{T}{4}} |i_{\text{lamp}}| < 0,3 \text{ A} \quad \wedge \quad \frac{8}{T} \int_{t_0 + \frac{7 \cdot T}{16}}^{t_0 + \frac{9 \cdot T}{16}} |E| > 200 \text{ lx} \rightarrow 250 \text{ bodů} \quad (4.26)$$

Konečně stav „**odskok kontaktů startéru**“ je zjištěn až následně z posloupnosti zjištěných stavů v případě, že se po sobě opakují stavy žhavení.

Po provedení testování je podle nejvyššího dosaženého bodového skóre známo, o jaký stav se jedná. Následně je prohledáván signál a vyhledá se konec daného stavu. Podmínky pro ukončení stavu jsou mírně odlišné od uvedených podmínek vyhledávání stavu následujícího. V některých případech se používá přesné dohledávání tak, aby bylo možné určit okamžik přechodu mezi stavy co nejpřesněji.

Na vyhledanou pozici konce stavu se posune ukazatel a jsou zaznamenány údaje o parametrech a délce trvání stavu. V tomto místě se vyhodnocují a ukládají sledované veličiny v příslušných stavech.

Tabulka 4.2: Veličiny vyhodnocované v jednotlivých stavech

Stav	Veličiny	Vztahy
Ohřev startéru	Energie na ohřev startéru E_s (J) Činný příkon do P_{Cp} (W) Napětí na U_{Cp} (U) Proud do I_{Cp} (I) Kapacita C_p (F)	$E_s = \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} u_{\text{starter}} i_{\text{lamp}} dt$ $P_{Cp} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} u_{\text{teleso}} (i_{\text{teleso}} - i_{\text{lamp}}) dt$ $C_p = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{(U_{Cp} I_{Cp})^2 - P_{Cp}^2}$
Žhavení	Energie na žhavení vláken E_z (J) Úbytek napětí na vláknech ΔU_f (V) Žhavicí proud I_z (A) Činný příkon tlumivky P_{tl} (W) Úbytek napětí na tlumivce ΔU_{tl} (V)	$E_z = \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} (u_{\text{lamp}} - u_{\text{starter}}) i_{\text{lamp}} dt$ $P_{tl} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} (u_{\text{teleso}} - u_{\text{lamp}}) i_{\text{lamp}} dt$

	Odpor vláken za studena $R_c (\Omega)$ Odpor vláken před zapálením $R_h (\Omega)$	$R_c = \frac{u_{\text{lamp}} - u_{\text{starter}}}{i_{\text{lamp}}} \cdot 2T \text{ po začátku žhavení}$ $R_h = \frac{u_{\text{lamp}} - u_{\text{starter}}}{i_{\text{lamp}}} \cdot 2T \text{ před koncem žhavení}$
Svícení	Intenzita sv. toku po zapálení $E_{\text{zap}} (\text{lm})$	$E_{\text{zap}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{begin}+T} \text{edt}$

Celý proces vyhledávání se opakuje, dokud není dosaženo konce oscilogramů. Rozhodovací úrovně byly nastaveny dle teoretických hodnot pro 36 W lineární zářivku s přihlédnutím k přesnosti měření. Chybovost vyhledání stavů je zanedbatelná.

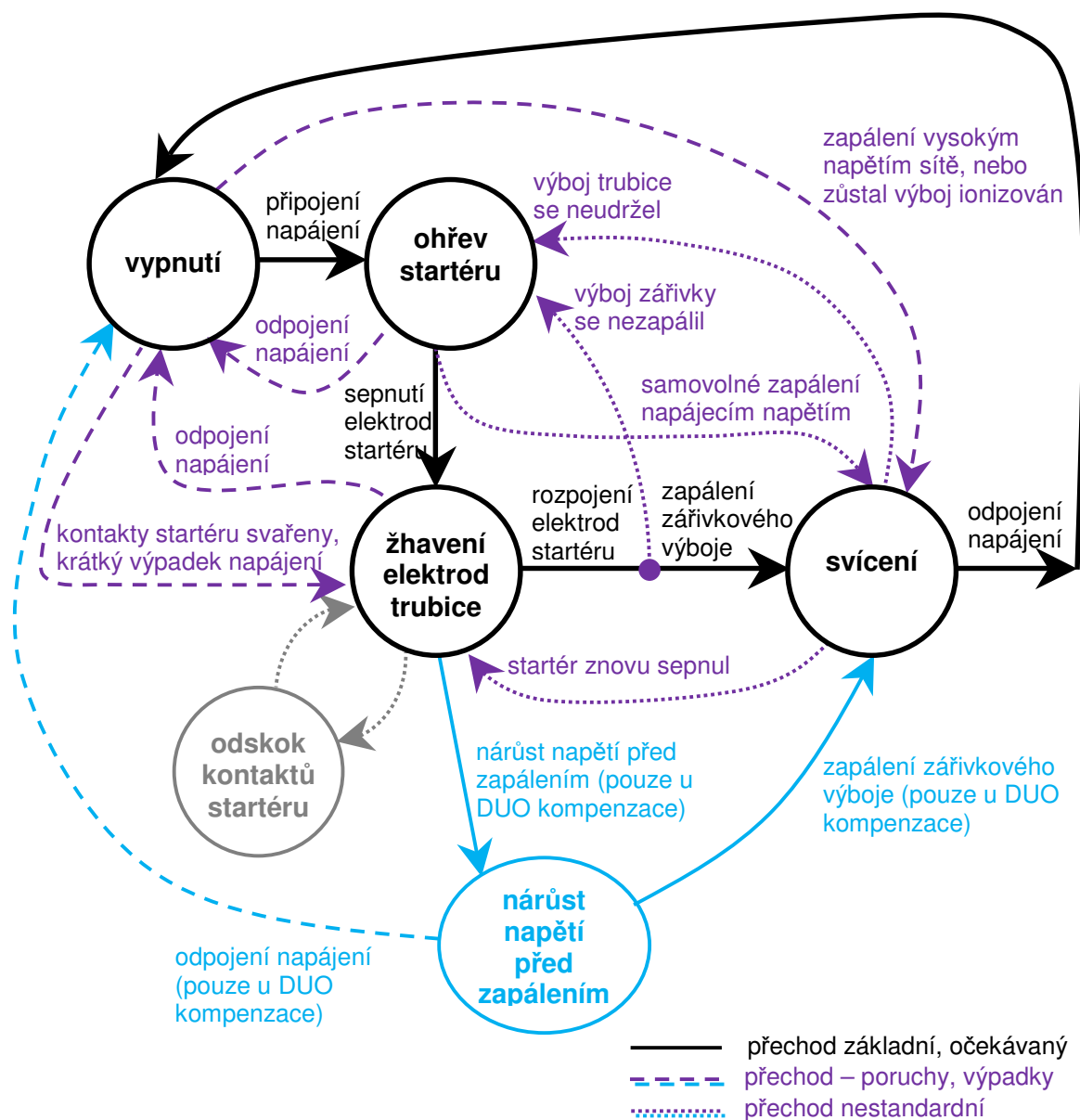
4.2 Stavový diagram startu zářivkového svítidla

Funkce obvodu, lze přehledně vystihnout stavovým diagramem zachycujícím jednotlivé stavy startování zářivkového tělesa, viz obr. 4.6.

Stavový diagram sestává ze čtyř základních stavů: ohřev startéru, žhavení elektrod trubice, svícení a vypnutí.

Pro DUO, resp. sériovou, kompenzaci byl navíc zařazen stav „nárůst napětí před zapálením“. Po rozpojení kontaktů startéru někdy nedojde k okamžitému zažehnutí výboje zářivky, ale dojde k němu až následně nárůstem napětí na zářivce, kdy se napětí na kondenzátoru sčítá se síťovým napětím až dojde k proražení výbojového kanálu zářivky. Tento případ nastává, když je žhavení ukončeno při průchodu žhavicího proudu okolím nuly a nevznikne dostatečně velké indukované napětí na zažehnutí výboje. Po důkladné analýze byl tento poměrně dlouhý přechodový děj označen zvláštním stavem. Lze tak na výsledcích sledovat, s jakou četností dochází k zapálení zářivky tímto mechanismem. Nutno zmínit, že zároveň s nárůstem napětí dochází k ohřevu startéru, který se ale následným zapálením výboje neuplatní.

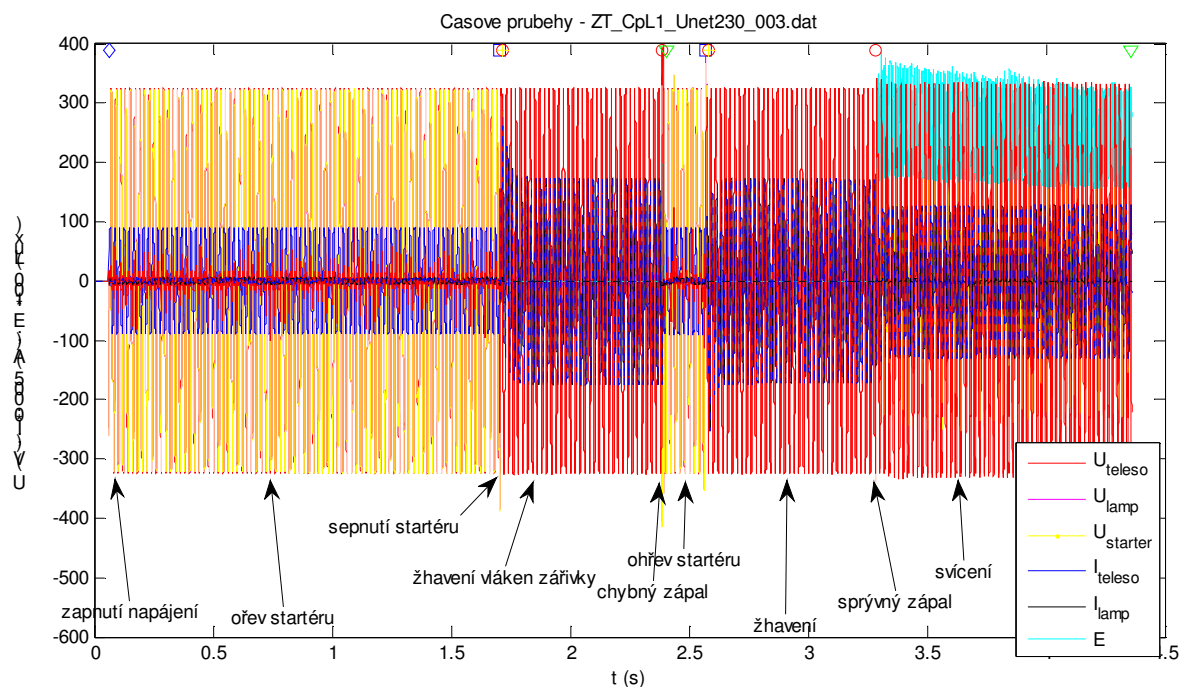
Ve stavovém diagramu figuruje také stav „odskok kontaktů“. Protože přítlak bimetalové elektrody startéru není vždy spolehlivý, dochází ke krátkodobým odskokům řádu jednotek μs . Chování odpovídá posuvnému kontaktu s povrchovým znečištěním. Doba trvání odskoku je mnohem menší než perioda sítě a energie ohřívající startér během odskoku je zanedbatelná. Jde o stav v podstatě nežádoucí, ale poměrně častý. Z toho důvodu byl tento stav označen zvláštním stavem a je diagramu vyznačen šedou barvou.



Obrázek 4.6: Stavový diagram zapalování zářivkového tělesa

Jednotlivé stavy jsou navzájem propojeny tzv. přechody, přičemž všechny se mohou v praxi uplatnit. Přechody vyznačené tečkovaně jsou přechody nestandardní a popis některých z nich včetně oscilogramů je uveden níže. Zbývající přechody, vyznačené čárkovaně, odpovídají poruchovým stavům a přerušení napájecího napětí. Poruchové přechody nebyly vyšetřovány.

Záznam typického průběhu startování zářivky s paralelní kompenzací účinku demonstruje obr. 4.7, ze kterého je zřetelný chybný zápal po nažhavení vláken zářivky. Dochází tak k opakování celého cyklu s výsledkem správného zápalu zářivky a následným svícením.



Obrázek 4.7: Záznam průběhu startu zářivky v zapojení s paralelní kompenzací (CpL1) dle obr. 2.3. Tlumivka DFT 5336 kategorie C, napájení 230 V

Na obrázku jsou zobrazeny všechny měřené veličiny. Pod horním okrajem jsou dobře patrné grafické značky vytvořené skriptem pro automatické rozpoznávání stavů.

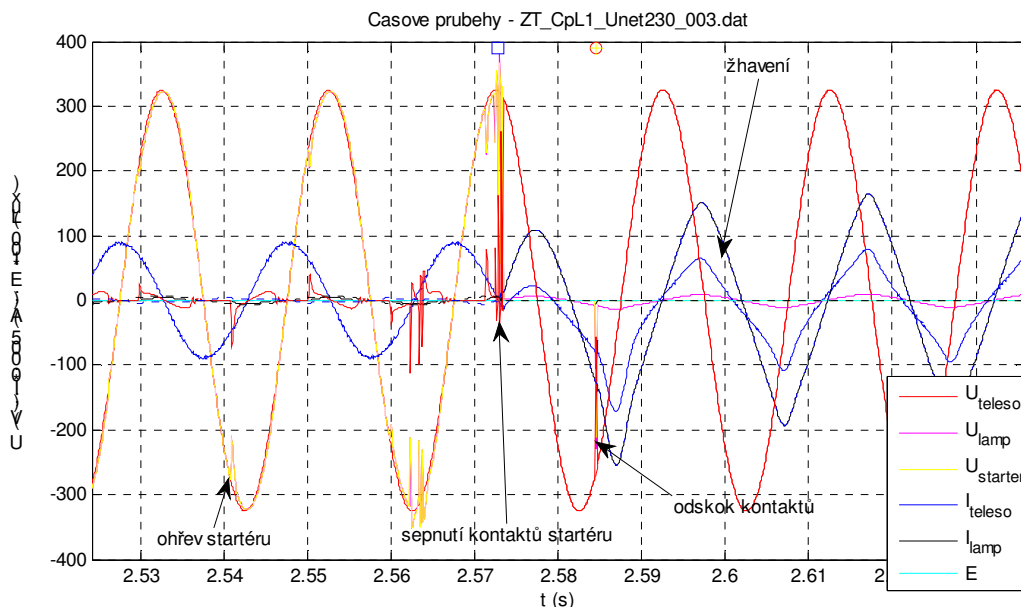
Tabulka 4.3: Význam grafických značek vymezujících rozhraní stavů

Značka	Význam
◇	Konec stavu bez napájení, začátek ohřevu startéru
□	Konec stavu ohřev startéru
○	Konec stavu žhavení
★	Odskok kontaktů startéru – žhavení pokračuje
▽	Konec stavu svícení
★	Konec stavu nárůst napětí na kondenzátoru sériové kompenzace

4.2.1 Sepnutí kontaktů startéru + odskok kontaktů

Na obr. 4.8 je příklad části průběhu se změnou obvodových veličin během sepnutí kontaktů startéru v zapojení s paralelní kompenzací účinníku (CpL1). V levé části průběhu dochází k ohřevu startéru, který běžně trvá desetiny až jednotky sekund. Protože je odběr svítidla určován kompenzačním kondenzátorem, odebírá svítidlo pouze kapacitní jalový výkon a činný příkon je díky vysokému odporu startéru zanedbatelný. Sepnutí startéru nastává v čase 2,573 s. Patrný je zde přechodový děj vzniklý tlumenou rezonancí na parazitních reaktancích obvodu. K obdobným zákmitům došlo již v časech

2,562 s a 2,564 s, zřejmě jako následek přeskočení mezi kontakty startéru v oblasti amplitudy napětí na startéru těsně před jeho sepnutím, kdy je vzdálenost mezi elektrodami minimální.

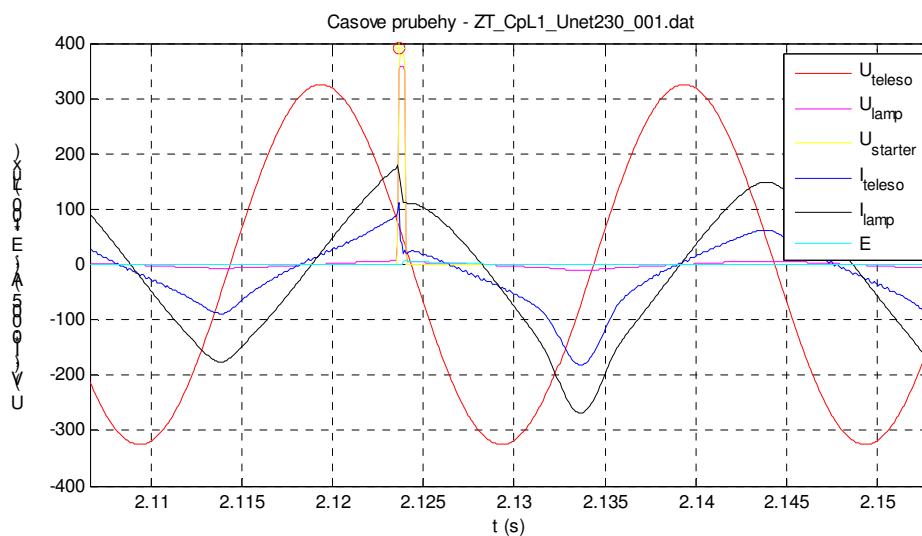


Obrázek 4.8: Změna obvodových veličin při sepnutí kontaktů startéru u paralelní kompenzace účiníku (CpL1)

Po sepnutí následuje stav žhavení, který je charakterizován změnou fáze celkového proudu svítidla. Vzárustající proud procházející elektrodami zářivky má, namísto harmonického, tvar spíše trojúhelníkový, což je způsobeno přesycením magnetického obvodu tlumivky. Viditelné saturační špičky v počátku sepnutí startéru se postupně ztrácí s odezníváním stejnosměrné složky magnetického toku, způsobeného sepnutím startéru.

Jak bylo zmíněno, poměrně často dochází u startování zářivkového svítidla ke krátkodobému odskoku kontaktů startéru, způsobeného pravděpodobně jejich smykovým pohybem vyvolaným bimetalem. Vzápětí po přerušení kontaktu dochází ke znovuoobnovení obvodu obloukem vyvolaným napětím indukovaným tlumivkou. K odskoku došlo na obrázku v čase 2,5845 s. Odskoky se objevují nahodile v celé délce doby trvání žhavení.

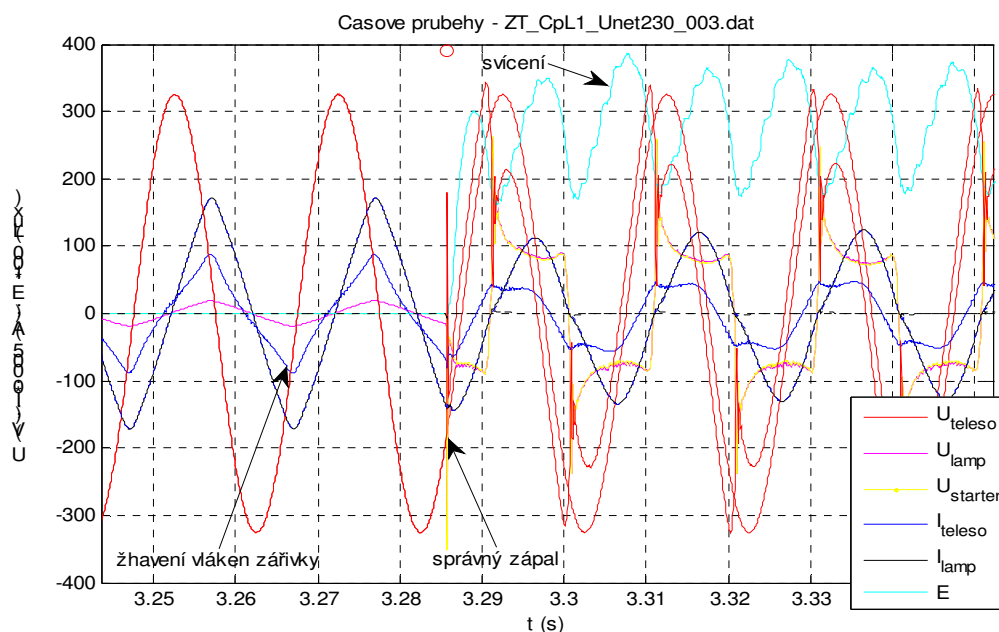
4.2.2 Odskok kontaktů



Obrázek 4.9: Odskok kontaktů u sériové kompenzace účinníku ($CsL1$)

4.2.3 Zapálení výboje zářivky (paralelní kompenzace)

Obr. 4.10 prezentuje změnu obvodových veličin při rozpojení kontaktů startéru. Po sepnutí kontaktů startéru přestane hořet doutnavý výboj startéru. Následně dochází k ochlazení bimetalových kontaktů a k jejich rozpojení. V momentě rozpojení a tedy otevření proudového žhavicího obvodu se naindukuje napětí ve vinutí tlumivky, které společně v součtu se síťovým napětím umožní zážeh výboje mezi elektrodami zářivky.



Obrázek 4.10: Změna obvodových veličin při rozepnutí kontaktů startéru u paralelní kompenzace účinníku ($CpL1$)

Zapálením výboje mezi elektrodami zářivky dochází ke svícení, na obrázku v čase 3,286 s. Po nastartování zářivky dojde ke změně fáze napájecího proudu svítidla $I_{\text{TĚLESO}}$ a rovněž klesnou amplitudy proudů procházejících elektrodami a svítidlem. Žhavicí proud procházející elektrodami I_{LAMP} přechází v proud výboje zářivky. Napětí na zářivce má typický průběh odpovídající negativnímu diferenciálnímu odporu zářivky s opětovným obnovením vodivosti po přechodu proudu výboje do opačné polarity.

Průběh intenzity osvětlení E je na obrázku vyznačen bleděmodrou barvou a byl získán ze snímače SFH 5711. Změna velikosti světelného toku je způsobena prolínáním několika dějů s různou dobou trvání. K úplné stabilizaci světelného toku dochází až po několika minutách, kdy je dosaženo provozní teploty zářivky a tedy provozního tlaku náplně. Z obrázku je patrné kolísání světelného toku v rytmu dvojnásobku napájecí frekvence. Díky schopnosti luminoforu akumulovat energii nedochází k poklesu intenzity až na nulu, ale pouze na cca 60 % maximální hodnoty. Ve stejných cyklech dochází ke spektrálním posunům barevného podání generovaného světla, protože každá složka luminoforu má z principu jinou časovou konstantu.

Na průběhu intenzity světelného toku je dobře patrná nesymetrie zářivkové trubice. Při hoření obloku v kladném směru proudu je vyzařován menší světelný tok oproti hoření obloku v opačném směru, kdy proud výboje prochází v záporném směru. To znamená, že úbytky na napětí na levé a pravé elektrodě nejsou zcela identické.

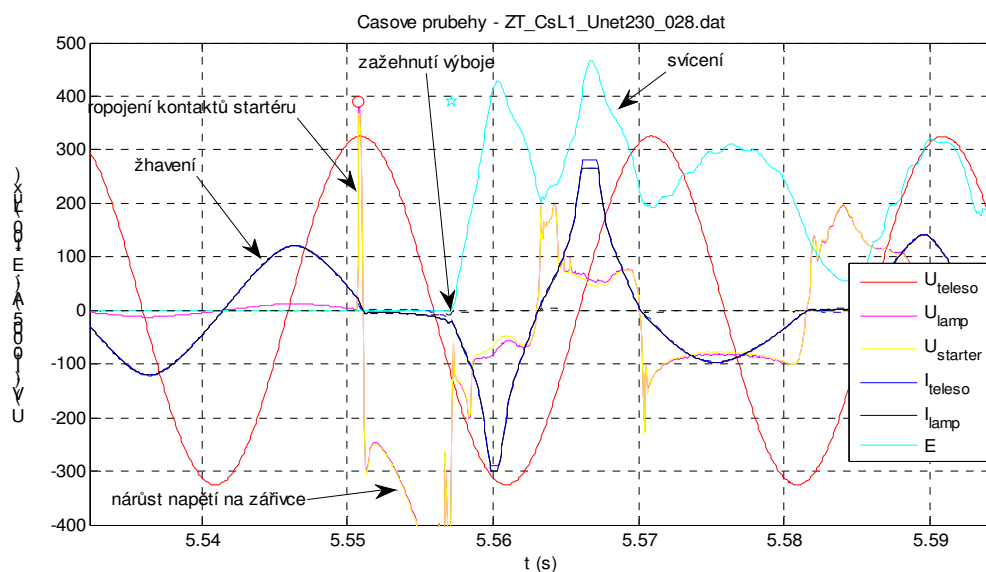
4.2.4 Zapálení výboje zářivky (sériová kompenzace)

Na obr. 4.11 je navzorkován přechod „žhavení – svícení“ v zapojení se sériovou kompenzací účinníku. Jak v části žhavení, tak u svícení, je dobře patrný kapacitní charakter odběru proudu. K rozpojení kontaktů startéru zde dochází v čase 5.551 s, tj. zároveň v době, kdy proud prochází právě okolím nuly. V případě přerušení proudu s vyšší hodnotou průběh zapálení odpovídá případu z předchozí podkapitoly.

Na rozdíl od paralelní kompenzace, u které v takovém případě dochází namísto zapálení zářivky k opakování celého zapalovacího cyklu (ohřev startéru, žhavení, zápal), dochází u sériové kompenzace k součtu síťového napětí s napětím na kompenzačním kondenzátoru.

V době rozpojení kontaktů startéru je kompenzační kondenzátor nabit na opačné napětí a síťové napětí klesá, čímž dochází k nárůstu celkového napětí na hodnotu potřebnou k zapálení výboje. Během této doby neteče obvodem téměř žádný proud.

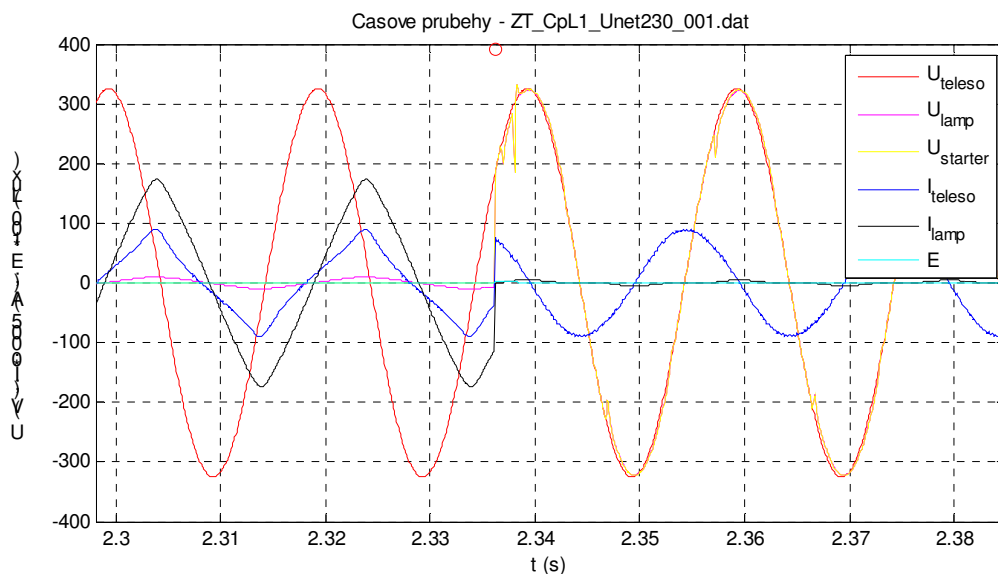
Z průběhu světelného toku je patrné, že výboj v zářivce ještě nedosáhl stability a téměř došlo jeho zhasnutí v následné periodě.



Obrázek 4.11: Přechod „žhavení – svícení“ u sériové kompenzace (CsL1)

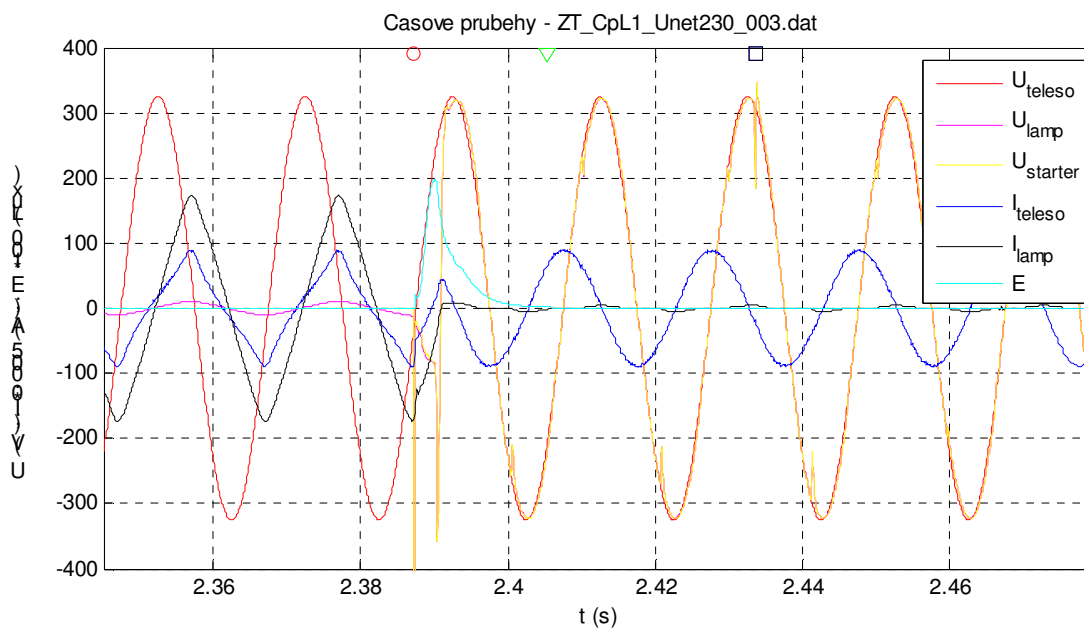
4.2.5 Neúspěšné zapálení zářivky

Obrázek 4.12 znázorňuje pokus o zapálení výboje po krátkém, a tedy nedostatečném nažhavení. K rozpojení kontaktů startéru došlo v čase 2,336 s, kdy se zároveň proud blíží k průchodu nulou. Indukované napětí nestačilo k zapálení výboje a svítidlo tak přešlo do stavu ohřev startéru.



Obrázek 4.12: Přechod „žhavení – ohřev startéru“, tj. neúspěšný zápal výboje zářivky (CpL1)

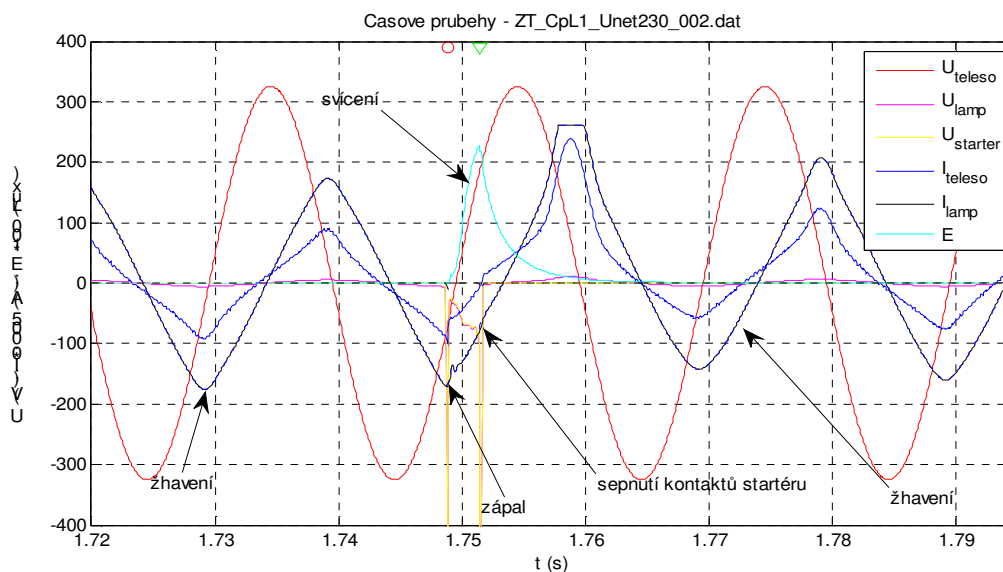
Obrázek 4.13 znázorňuje o něco lepší podmínky, kdy po nedostatečném nažhavení došlo k rozpojení proudu téměř v maximu. Indukované napětí prorazilo výbojový kanál zářivky. Výboj ovšem zanikl při průchodu proudu zářivkou nulou, kdy se nosiče náboje ve výbojovém kanále rychle rekombinovaly. Snímač světelného toku zaznamenal krátký světelný impuls s exponenciálním odezněním odpovídajícím akumulací schopnosti luminoforu zářivkové trubice.



Obrázek 4.13: Přechod „žhavení – svícení – ohřev startéru“, tj. neúspěšný zápal výboje zářivky (CpL1)

4.2.6 Opětovné sepnutí kontaktů startéru

Nestandardním přechodem je opětovné sepnutí startéru v době, kdy už výboj zářivky hoří, viz obr. 4.14. Vznik tohoto přechodu je v principu podobný přechodu „odskoku kontaktů startéru“. Je způsoben malým přitlakem kontaktů na konci doby jejich chladnutí. Výboj startéru se opětovně zapaluje, dochází k ohřevu jeho kontaktů až do spojení. Přerušení obvodu je v porovnání s přechodem „odskoku kontaktů“ delší, a zářivka se tak stihne zapálit a vygenerovat světlo. Dochází rovněž k přechodovému ději a přesycení tlumivky. Na obrázku je viditelná drobná chyba, která reprezentuje saturaci proudové sondy pro měření proudu zářivkou I_{LAMP} . Jedná o krátký horizontální úsek v čase 1,758 s, na černě zbarvené křivce. Důvodem bylo nastavení měřicího systému na kompromis mezi snímanými hodnotami a přesností. K saturaci dochází přibližně nad hodnotou 1,2 A.



Obrázek 4.14: Nestandardní přechod „žhavení – svícení“ a „svícení – žhavení“, paralelní kompenzace účinníku (CpL1)

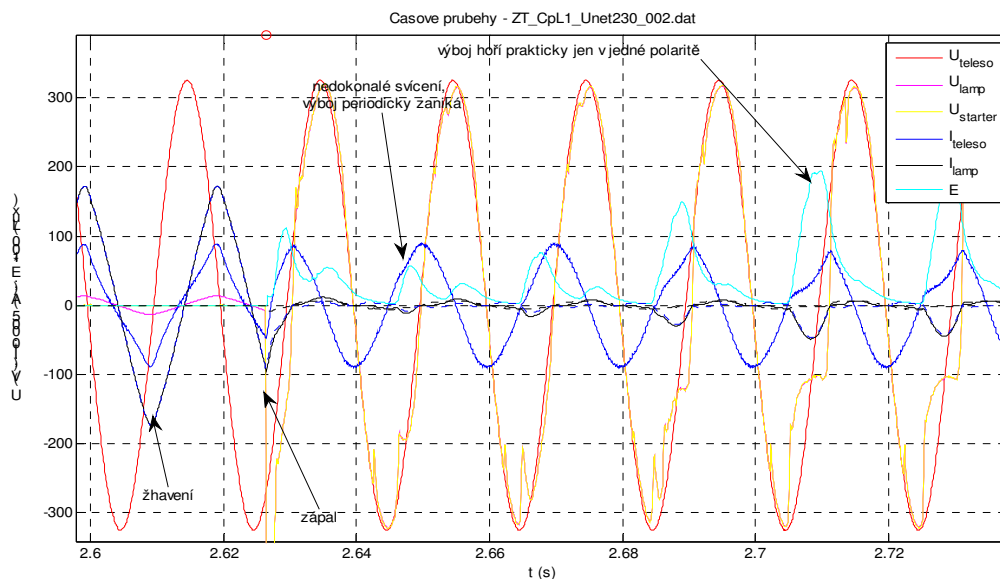
4.2.7 Zapálení zářivky s nedostatečně nažhavenými elektrodami

Při zapalování zářivkového svítidla se, kromě standardních přechodů, vyskytují i přechody nestandardní. Příkladem jsou cyklické přechody „svícení – ohřev startéru – svícení“. Ty lze vysvětlit nedostatečným žhavením vláken zářivky. Termoemisivita vláken s nízkou teplotou vede na velký katodový úbytek. Výboj má tendenci zanikat. Obvyklé je, že výboj hoří jen v jedné polaritě napájecího napětí a to v tom směru, na kterém katoda dosáhla vyšší teploty. K průchodu proudu výbojem zářivky dochází pouze v části periody, kdy napětí na zářivce nabývá hodnot v okolí své amplitudy.

Situace se může vyvíjet podle dvou scénářů. Buď se katody dopadem iontů stále více zahřívají a podíl svícení zářivky postupně narůstá až k úplnému svícení, nebo převládá chladnutí elektrod a podíl svícení ubývá až úplnému zániku a zářivka přejde do stavu ohřevu startéru.

Startér je ovšem aktivní i v této době nedokonalého svícení. Napětí na startéru totiž zpravidla minimálně v jedné polaritě překračuje jeho zápalné napětí. Může se tedy stát, že tento stav ukončí startér sepnutím kontaktů.

Zastoupení tohoto přechodu mezi stavy je malé. Stavový diagram popisuje tento jev cyklickými přechody mezi svícením a ohřevem startéru. Díky tomu, že doba nedokonalého svícení je poměrně dlouhá, mají tyto přechody poměrně významné četnosti.



Obrázek 4.15: Svícení s nízkou teplotou elektrod (CpL1)

4.3 Četnosti přechodů mezi jednotlivými stavy

Zpracováním dat byly získány stavové diagramy ohodnocené četnostmi přechodů mezi jednotlivými stavy startování zářivkového tělesa. Četnost je obecně definována takto (např. podle [Rek73]):

„Pokud v n pokusech nastane jev A právě k -krát, pak se k nazývá (*absolutní*) četností jevu A a k/n poměrnou (*relativní*) četností jevu A v uvažovaných pokusech.“

Relativní četnosti některých jevů mají tendenci se s rostoucím počtem opakování ustalovat nebo blížit se určitým hodnotám. Tato skutečnost se nazývá *stabilitou relativních četností*. Číslo, ke kterému se relativní četnost blíží, lze považovat za statistickou pravděpodobnost daného jevu.

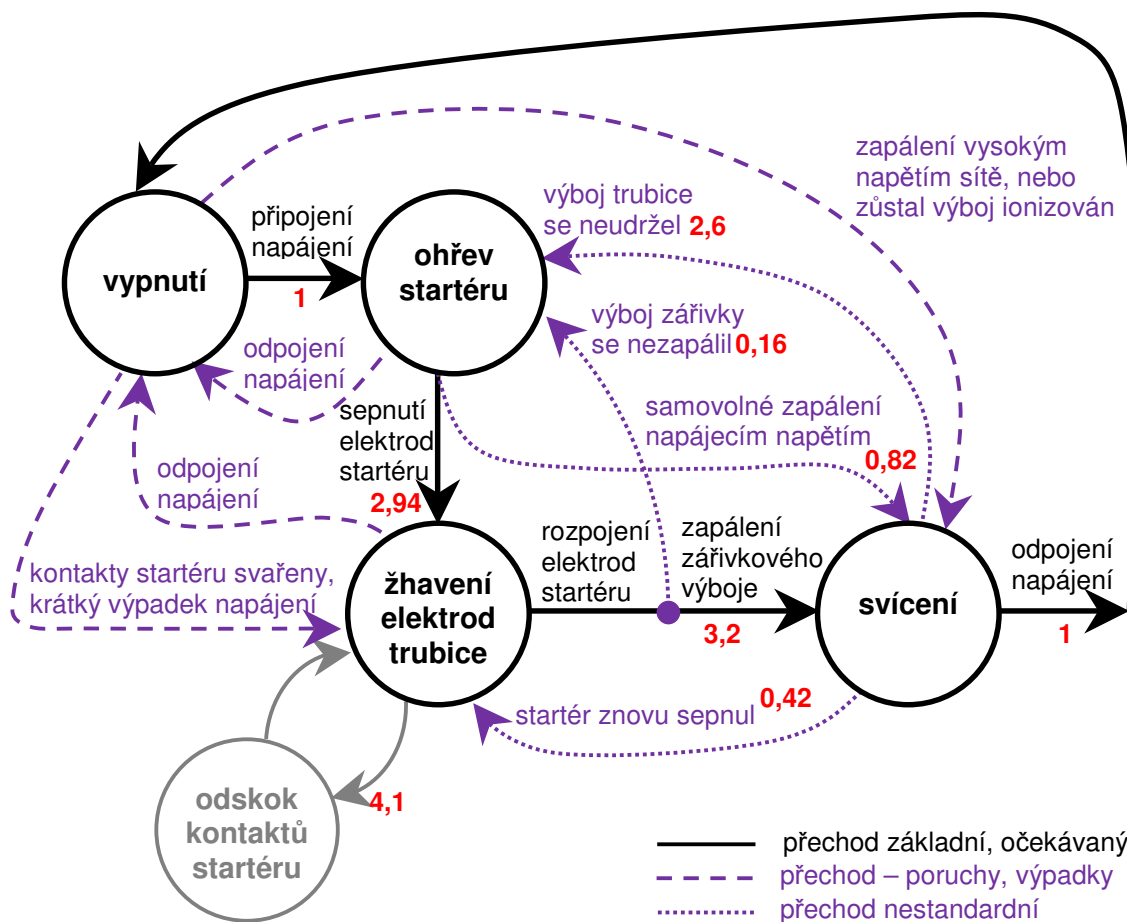
Statistická pravděpodobnost jevu A je tak definována jako limita relativní četnosti jevu A , zvyšuje-li se počet pokusů $n \rightarrow \infty$.

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{k}{n}. \quad (4.27)$$

Např. $P(A) = 0,25$ tedy znamená, že při velkém množství pokusů nastane jev A přibližně ve 25 % případů [Kob04].

Hodnoty uvedené v diagramech na obrázcích 4.16 a 4.17 tedy představují průměrnou četnost přechodů během jednoho startu zářivky. Přechody, které zůstaly neohodnoceny (v diagramu vyznačeny čárkovaně), jsou způsobovány poruchovými

stavy nebo výpadky napájení během rozběhu. Vzhledem k tomu, že tyto podmínky testovány nebyly, nabývaly četnosti přechodů nulových hodnot.



Obrázek 4.16: Stavový diagram zapalování zářivkového tělesa s četnostmi přechodů mezi stavy, zářivka s paralelní kompenzací účinníku ($CpL1$) a napájením $U_{t\acute{e}leso} = 230\text{ V}$, svítidlo 11, 50 měření

Protože bylo napětí pro každý oscilogram zapnuto pouze jednou na začátku měření, nabývaly přechody ze stavu „vypnutí“ do stavu „ohřev startéru“ vždy četnosti 1. Stejnou hodnotu četnosti, tj. 1, měl i přechod mezi stavy „svícení“ a „vypnutí“, který odpovídá vypnutí svítidla.

Základní přechody mezi stavy „ohřev startéru“, „žhavení“ a „svícení“, vyznačené ve stavovém diagramu černou barvou, jsou přechody očekávané a nastávají během zapálení minimálně jednou, tj. při zapálení na první pokus, a proto jejich četnosti mohou nabývat hodnot 1 a více. Bude-li například četnost přechodu mezi ohřevem startéru a žhavením nabývat hodnoty 2,94, znamená to, že zářivka v daném zapojení provede průměrně 2,94 žhavení na jeden start.

Samozřejmou podmínkou je, že součet četností přechodu vedoucí ke změně na určitý stav, musí být roven součtu četností přechodů z tohoto stavu.

Větší pozornost je třeba věnovat přechodům mezi stavy, které jsou zakresleny tečkovaně. Jedná se o tzv. přechody nestandardní, které se běžně v literatuře nepopisují, nicméně jejich četnosti nejsou zdaleka zanedbatelné.

Kompletní výsledky pro všechna zapojení a napájecí napětí jsou uvedeny v příloze 7.3.

Rozdíl četností přechodů pro tlumivku kategorie C (L1) a kategorie B (L2) je pro jmenovité napájecí napětí uveden v tabulkách 4.4 a 4.5. Kompletní výsledky jsou opět v příloze 7.3.

*Tabulka 4.4: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku s **paralelní** kompenzací účinníku (CpL1) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření*

PŘECHOD		DO STAVU				
		VYPNUTÍ	OHŘEV STARTÉRU	ŽHAVENÍ	ODSKOK	SVÍCENÍ
ZE STAVU	VYPNUTO	0	1	0	0	0
	OHŘEV STARTÉRU	0	0	2,94	0	0,82
	ŽHAVENÍ	0	0,16	0	4,1	3,2
	ODSKOK	0	0	4,1	0	0
	SVÍCENÍ	1	2,6	0,42	0	0

*Tabulka 4.5: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku s **paralelní** kompenzací účinníku (CpL2) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření*

PŘECHOD		DO STAVU				
		VYPNUTÍ	OHŘEV STARTÉRU	ŽHAVENÍ	ODSKOK	SVÍCENÍ
ZE STAVU	VYPNUTO	0	1	0	0	0
	OHŘEV STARTÉRU	0	0	2,72	0	0,6
	ŽHAVENÍ	0	0,16	0	5,24	2,94
	ODSKOK	0	0	5,24	0	0
	SVÍCENÍ	1	2,16	0,38	0	0

Protože podmínky měření byly pro obě tlumivky identické, můžeme tvrdit, že tlumivka s nižším sycením (L2) způsobuje, oproti tlumivce (L1), nárůst úspěšnosti zapálení výboje o 16 %, tj. ubylo přechodů, kdy zaniká výboj v zářivce: svícení-ohřev startéru a svícení-žhavení. Ubylo také přechodů, kdy se střídají stavy ohřev startéru-svícení. Tyto opačné přechody se vyskytují prakticky jen při zapálení nedostatečně nažhavené trubice. To znamená, že kategorie tlumivky ovlivňuje i dobu setrvání

v režimu nedokonalého hoření výboje v zářivce, kdy je výboj nestabilní a po část periody zaniká.

Pro tlumivku L2 je, oproti L1, větší počet odskoků bimetalových kontaktů startéru ve fázi žhavení. Pro jmenovité napětí 230 V to je o 22 %, přestože celková doba žhavení, jak plyne z tabulky 4.6, se zvýšila pouze o necelých 8 %. Takový nárůst počtu odskoků není způsoben pouze prodloužením celkové doby žhavení.

Celkové doby žhavení byly vypočteny jako součet dílčích žhavení během jednoho startu. V tabulce 4.6 jsou uvedeny mediány z 50 měření. Doba žhavení nemá normální rozdělení, proto byly použity mediány. Velmi zajímavé je, že vliv kategorie tlumivky na celkovou dobu žhavení je u sériové kompenzace účinníku opačný než u kompenzace paralelní, a to na všech napěťových hladinách. Tlumivka s nižšími ztrátami (L2) má u sériové kompenzace kratší celkovou dobu žhavení. Obdobně dopadly výsledky výběrového souboru 12 svítidel. Rozdíl mezi oběma výběrovými soubory je patrně dán rozptylem parametrů komponent svítidel. U paralelní kompenzace účinníku je největší rozdíl mezi výběrovými soubory, a to pro oba typy tlumivek <9 %. U sériové kompenzace je to až 22 %. Změna směru trendu je zjevně závislá na velikosti žhavicího proudu, kde se uplatňuje charakter rezonačního obvodu u sériové kompenzace.

Tabulka 4.6: Celková doba žhavení připadající na 1 start, pro zářivku 11, medián z 50 měření

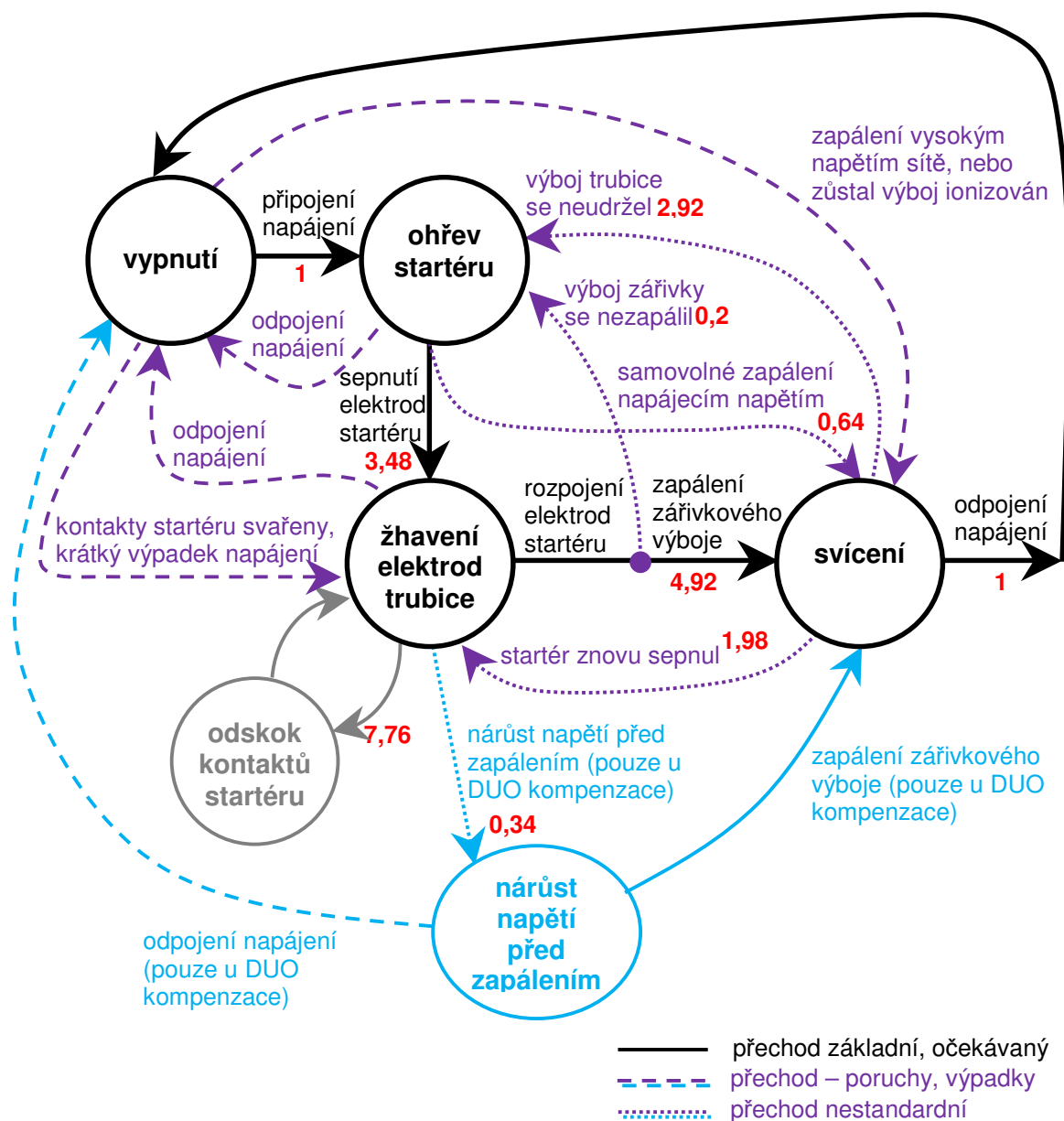
NAPĚTÍ ZDROJE (V)	CELKOVÁ DOBA ŽHAVENÍ NA 1 START Σt_z (s)				
	CPL1	CPL2	CSL1	CSL2	L1
207 V	2,47	3,04	4,16	3,70	2,75
218 V	1,89	2,30	3,49	3,25	1,98
230 V	1,62	1,76	3,02	2,90	1,59
241 V	1,17	1,21	2,61	2,55	1,18
253 V	0,84	1,04	2,36	2,25	0,91

Tabulka 4.7: Celková doba žhavení připadající na 1 start, pro sadu svítidel 1÷12, mediány z 10×12 měření

NAPĚTÍ ZDROJE (V)	CELKOVÁ DOBA ŽHAVENÍ NA 1 START Σt_z (s)				
	CPL1	CPL2	CSL1	CSL2	L1
207 V	2,70	3,18	3,74	3,26	2,58
218 V	2,02	2,33	3,04	2,82	1,94
230 V	1,59	1,80	2,60	2,30	1,52
241 V	1,21	1,37	2,32	2,04	1,18
253 V	0,92	0,98	2,00	1,75	0,89

Přehledový graf četností přechodů pro sériovou kompenzaci s tlumivkou L1 pro

jmenovité napájecí napětí je uveden na obr. 4.17. Na rozdíl od paralelní kompenzace zde přibyl stav „nárůst napětí před zapálením“, plynoucí ze změn zapalovacího procesu, způsobených sériovým zařazením kompenzačního kondenzátoru. Poměr tohoto jevu k standardnímu okamžitému zapálení je 7 %.



Obrázek 4.17: Stavový diagram zapalování zářivkového tělesa s četnostmi přechodů mezi stavy, zářivka se **sériovou** kompenzací ($CsL1$) účinníku a napájením $U_{\text{těleso}} = 230 \text{ V}$, svítidlo 11, 50 měření

Počty žhavení na jedno zapálení jsou u sériové kompenzace vyšší až o 40 %. Doby

trvání stavů rozdělujících žhavení na úseky jsou ovšem relativně krátké. Současně pro sériovou kompenzaci oproti kompenzaci paralelní narostl i počet „odskoků kontaktů startéru“ a to o 90 % u tlumivky kategorie C (L1) a o 50 % u tlumivky kategorie B (L2). Základní příčinou je nárůst celkové doby žhavení, u kterého můžeme očekávat přímou souvislost s počtem odskoků kontaktů bimetalového startéru. Další příčinou by mohl být rozdílný žhavicí proud, ale tomu neodpovídá rozdíl počtu odskoků mezi měřeními s tlumivkami L1 a L2. Vysvětlení spočívá v rozdílném charakteru relaxačního napětí na právě rozpojených kontaktech startéru způsobeném vložením sériového kompenzačního kondenzátoru.

Tabulka 4.8: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku se **sériovou** kompenzací účinníku (CsL1) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

PŘECHOD		DO STAVU					
		VYPNUTÍ	OHŘEV STARTÉRU	ŽHAVENÍ	ODSKOK	SVÍCENÍ	NÁRŮST NAPĚTÍ
ZE STAVU	VYPNUTO	0	1	0	0	0	0
	OHŘEV STARTÉRU	0	0	3,48	0	0,64	0
	ŽHAVENÍ	0	0,2	0	7,76	4,92	0,34
	ODSKOK	0	0	7,76	0	0	0
	SVÍCENÍ	1	2,92	1,98	0	0	0
	NÁRŮST NAPĚTÍ	0	0	0	0	0,34	0

Tabulka 4.9: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku se **sériovou** kompenzací účinníku (CsL2) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

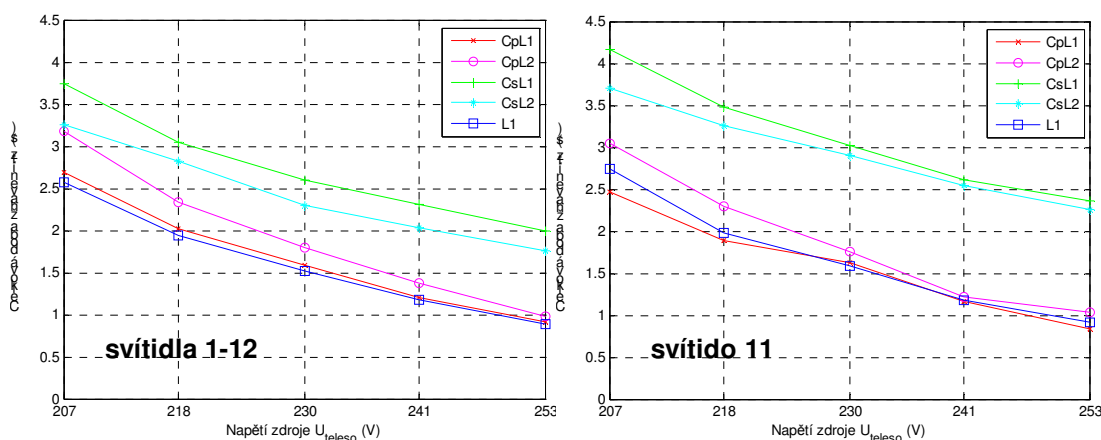
PŘECHOD		DO STAVU					
		VYPNUTÍ	OHŘEV STARTÉRU	ŽHAVENÍ	ODSKOK	SVÍCENÍ	NÁRŮST NAPĚTÍ
ZE STAVU	VYPNUTO	0	1	0	0	0	0
	OHŘEV STARTÉRU	0	0	3,14	0	0,58	0
	ŽHAVENÍ	0	0,12	0	8,04	4,32	0,52
	ODSKOK	0	0	8,04	0	0	0
	SVÍCENÍ	1	2,60	1,82	0	0	0
	NÁRŮST NAPĚTÍ	0	0	0	0	0,52	0

Celkově je patrné, že počty neúspěšných pokusů o zapálení výboje zářivky jsou u sériové kompenzace vyšší. Termoemisní vrstva elektrod je v průběhu neúspěšných zápalů více namáhána vysokými gradienty elektrostatického pole, a to má za důsledek kratší dobu života zářivkových trubic v zapojení se sériovou kompenzací.

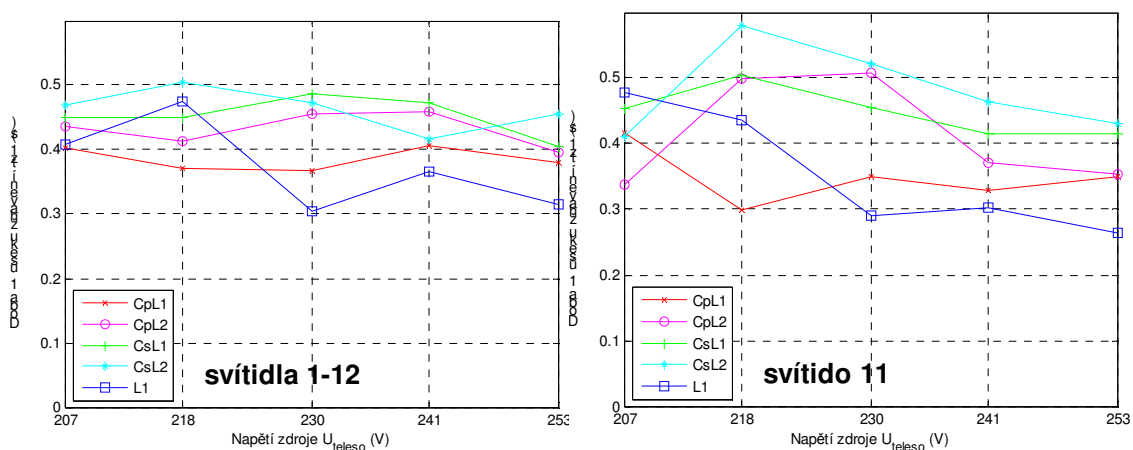
Tlumivka s nižšími ztrátami (L2) má u sériové kompenzace pozitivní vliv a snižuje

počet odskoků kontaktů startéru během žhavení. Snižuje také četnosti přechodů mezi stavy „ohřev startéru“ – „svícení“ – „ohřev startéru“, které jsou charakteristické pro zapálení zářivky s nedostatečně nažhavenými elektrodami. Naopak vliv na podíl počtu zapálení probíhajících přes stav „nárůst napětí na zářivce před zapálením“ nebyl potvrzen.

Na obr. 4.18 jsou graficky znázorněny výsledky celkových dob žhavení – tj. součtu dílčích úseků žhavení během jednoho startu z dat v tabulkách 4.6, 4.7. S přibývajícím napětím se doba žhavení zkracuje jako důsledek nárůstu počtu neúspěšných zapálení výboje zářivky. Dobře patrné je delší žhavení u předřadníků se sériovou kompenzací účinníku.



Obrázek 4.18: Závislost mediánů celkové doby žhavení na napájecím napětí pro různé způsoby kompenzace účinníku, vlevo výběrový soubor **svítidla 1÷12** (10×12×5×5 měření), vpravo výběrový soubor **svítidlo 11** (50×5×5 měření)“



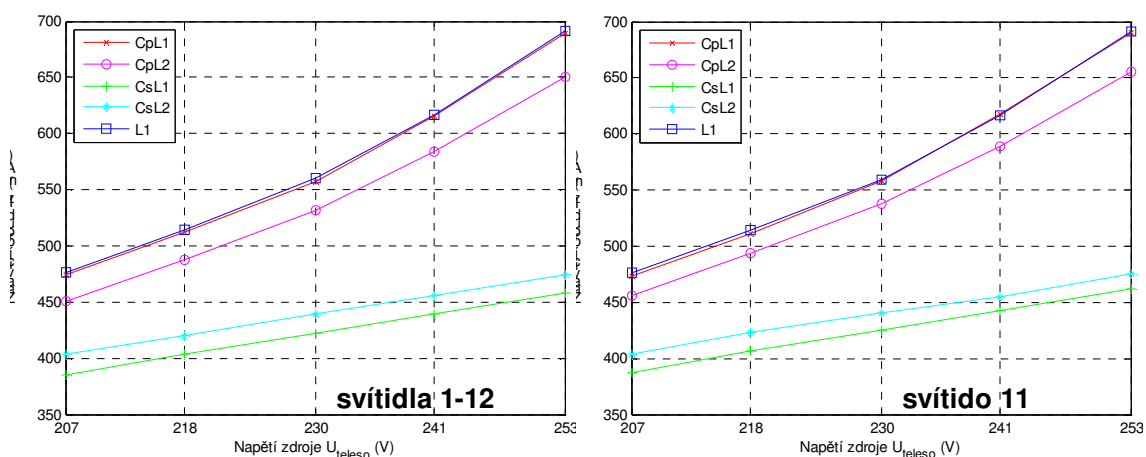
Obrázek 4.19: Závislost mediánů doby 1. úseku žhavení na napájecím napětí pro různé způsoby kompenzace účinníku, vlevo výběrový soubor

svítidla 1÷12 ($10 \times 12 \times 5 \times 5$ měření), vpravo výběrový soubor **svítidlo 11** ($50 \times 5 \times 5$ měření)

Zajímavé je porovnání s dobou 1. úseku žhavení na obr. 4.19. Ta je ovlivněna především tepelnou charakteristikou doutnavkového startéru. Při žhavení, prostor doutnavkového startéru chladne. Rychlost ochlazování závisí na proměnné okolní teplotě. Dalo by se očekávat, že pro nižší napětí, kde trvá ohřev startéru mnohem déle, bude i doba 1. žhavení delší – to se ovšem nepotvrdilo.

Možným důvodem je ohříváním prostoru startéru průchodem žhavicího proudu jeho kontakty. Nižší teplo dodané tímto odporovým ohřevem můžeme kompenzovat vyšší velikostí okolní teploty u nižších napájecích napětí svítidla.

Charakter změn žhavicího proudu s napájecím napětím a topologií zapojení svítidla je uveden na obr. 4.20. Výrazná je vyšší strmost křivek pro paralelní kompenzaci. U sériové kompenzace se totiž uplatňuje stabilizační efekt sériového RLC obvodu.



Obrázek 4.20: Závislost žhavicího proudu na napájecím napětí pro různé způsoby kompenzace účinníku, vlevo výběrový soubor **svítidla 1÷12** ($10 \times 12 \times 5 \times 5$ měření), vpravo výběrový soubor **svítidlo 11** ($50 \times 5 \times 5$ měření)

4.4 Histogramy dob trvání jednotlivých stavů

Z důvodu větší přehlednosti byly informace zpracované v tabulkách zobrazeny prostřednictvím histogramů, které jsou cenným výstupem z měření a zachycují délku trvání jednotlivých stavů v závislosti na napájecím napětí zářivkových těles.

Na jednom obrázku je vždy porovnán tentýž stav pro oba typy kompenzace účinníku: paralelní (Cp) a sériová větev duo kompenzace (Cs), a to pro oba typy tlumivek

(L1) a (L2), viz tab. 4.10.

Vyhodnocení je opět provedeno pro dva typy výběrového souboru: a) 1 svítidlo a b) 12 svítidel. Měření byla provedena na 12 zářivkových trubicích označených pořadovými čísly 1 až 12. Ve výběrovém souboru b) bylo tedy provedeno pro každou trubicí 10 měření za stejných podmínek, tzn. 10 měření pro jedno z pěti měřených zapojení předřadníku a jednu hodnotu z pěti napájecích napětí svítidla. Celkem to znamená 3000 měření. Výsledky z výběrového souboru b) lépe odrážejí skutečnost, protože se zde zprůměrují parazitní vlivy, např. okolní teploty při měření. Výsledky z tohoto výběrového souboru nejlépe odpovídají teoretickým předpokladům. Na výběrovém souboru a) zas můžeme sledovat variabilitu výsledků změřených na identických komponentech.

Tabulka 4.10: Označení měřených zapojení

OZNAČENÍ	POPIS
CPL1	PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU (CP), TLUMIVKA KATEGORIE C (L1)
CPL2	PARALELNÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU (CP), TLUMIVKA KATEGORIE B (L2)
CSL1	SÉRIOVÁ VĚTEV DUO KOMPENZACE ÚČINÍKU, TLUMIVKA KATEGORIE C (L1)
CSL2	SÉRIOVÁ VĚTEV DUO KOMPENZACE ÚČINÍKU, TLUMIVKA KATEGORIE B (L2)
L1	NEKOMPENZOVANÁ VĚTEV DUO KOMPENZACE, TLUMIVKA KATEGORIE C (L1)

4.4.1 Ohřev startéru

Na obr. 4.21 jsou vyneseny četnosti trvání stavu „ohřevu startéru“. První ohřev startéru po přivedení napájení na těleso je reprezentován nižšími sloupci v časech nad jednu sekundu, což odpovídá normální funkci startéru. Součet četností těchto malých sloupců musí tedy být vždy jedna. Výrazná závislost ohřevu na napájecím napětí není lineární a odpovídá ploše sinusového průběhu napětí na svítidle $U_{\text{teleso}} = U \cdot \sin(\omega t)$.,

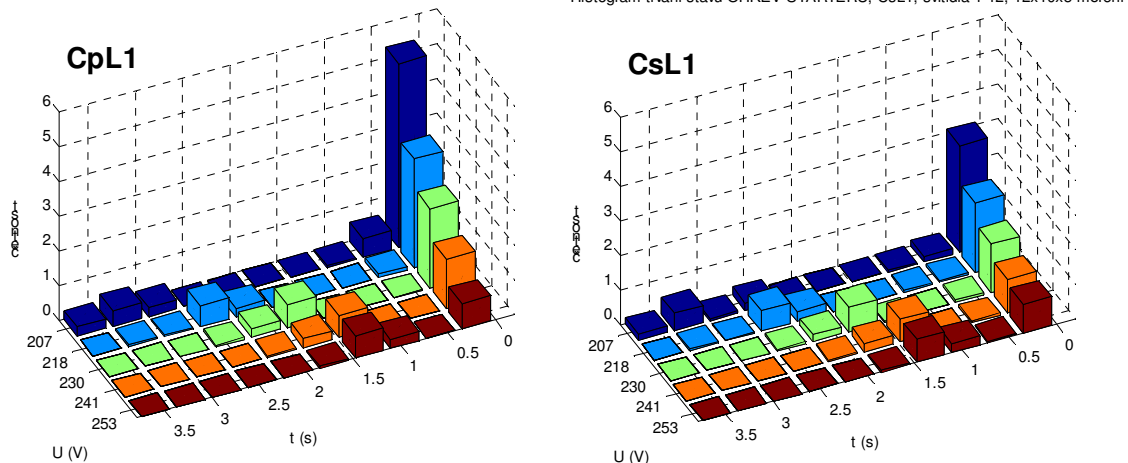
který je větší než zápalné napětí startéru $\int_{U_{\text{zapal}}}^{\infty} U_{\text{teleso}} du > U_{\text{zapal}}$. Tato část grafů je

neoměnná pro různé tlumivky i zapojení kompenzací. To ostatně vyplývá z analýzy obvodu ve stavu „ohřev startéru“. Největší impedanci zde představuje samotný doutnavý výboj startéru a nevelké změny impedance tlumivky, případně sériově zapojeného kondenzátoru, téměř neovlivní dobu ohřevu startéru.

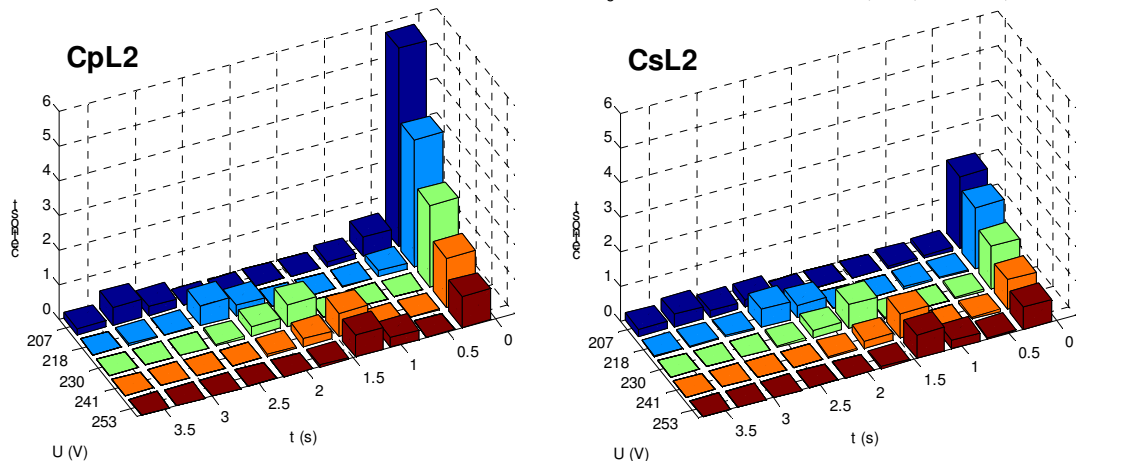
V grafech na obr. 4.21 jsou dále patrné vysoké četnosti stavu „ohřev startéru“ s časem pod jednu sekundu, které odpovídají dalším krátkým ohřevům startéru, kdy se nepovedlo trubicí rozsvítit napoprvé a bylo nutné její dožhavení, nebo se jednalo o další přechodové stavy s nestabilním výbojem.

Při porovnání obou kompenzací jsou četnosti těchto následných ohřevů startéru v sériové větvi DUO kompenzace mnohem menší, což znamená, že zapálení proběhne s menším počtem cyklů startéru. Počet cyklů žhavení je ale naopak v sériové větvi vyšší.

Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CpL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CsL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



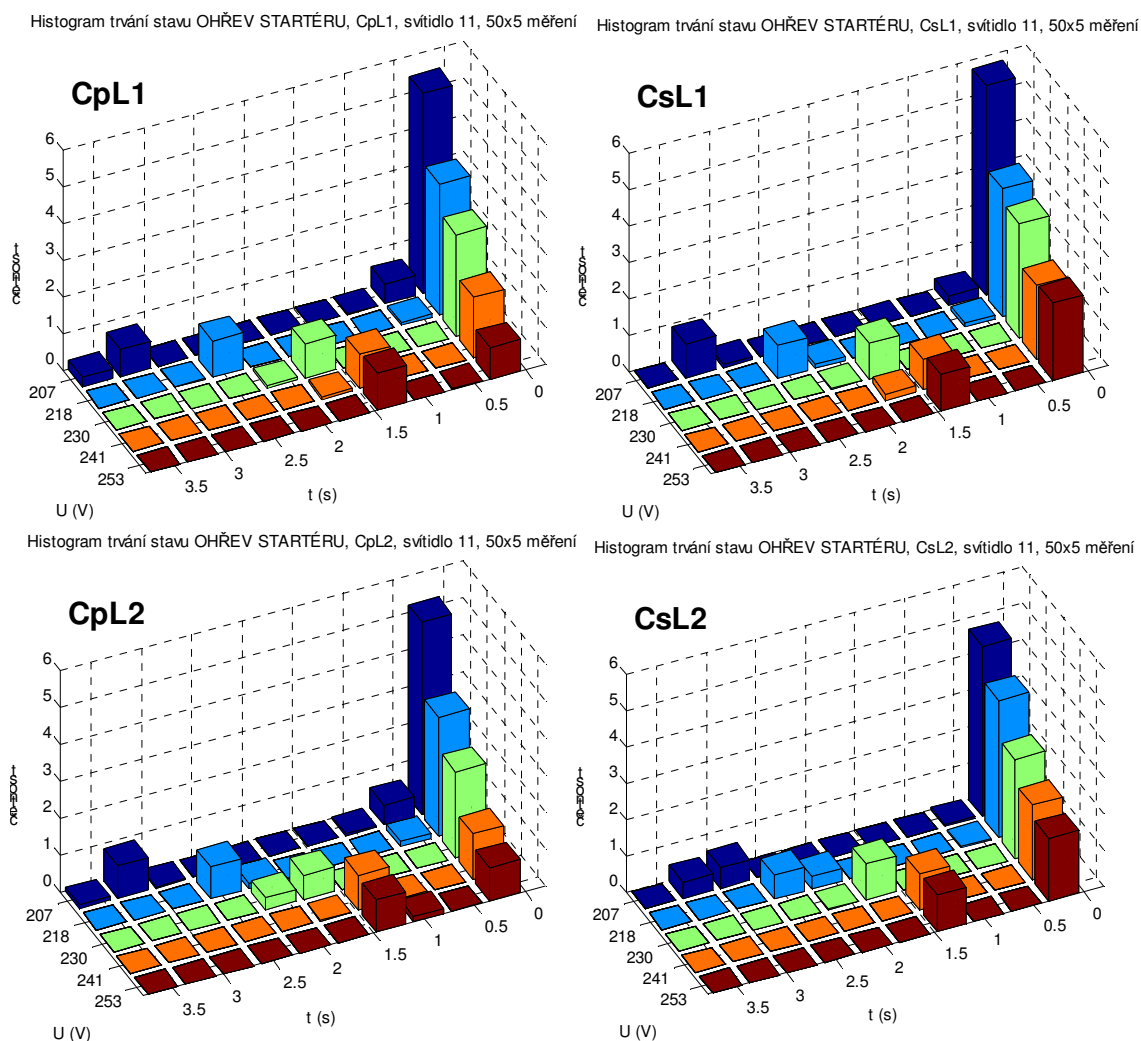
Obrázek 4.21: Četnost doby **trvání stavu „ohřev startéru“** během 12×10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumičkou L1 a L2

Tento rozpor je dán mnohem větším počtem přechodů ze stavu „svícení“ do stavu „žhavení“ v sériové větvi. Jde o špatný kontakt bimetalového startéru, zatímco u paralelní kompenzace dojde při přerušení obvodu při odskoku k prudkému nárůstu indukovaného napětí cca $300 \text{ V}/\mu\text{s}$ a průrazu nevodivého kontaktu. Sériový kompenzační kondenzátor způsobuje snížení strmosti nárůstu napětí na kontaktech startéru $< 200 \text{ V}/\mu\text{s}$. Vodivost kontaktů není obnovena, ale napětí je dostatečné k proražení výbojového kanálu zářivkové trubice. To způsobí krátkodobý záblesk světla, který je ukončen opětovným spojením kontaktů startéru.

Na částech histogramu s časy pod 1s je opět patrná změna počtu stavů „ohřev startéru“ při použití tlumivky L1 a L2. Ta souvisí se změnou žhavicího proudu, který tlumivka ovlivňuje.

Obecně lze konstatovat, že počet cyklů, resp. stavů nutných k rozsvícení zářivky, ubývá s vyšším napájecím napětím.

Výsledky pro výběrový soubor a) jednoho svítidla na obr. 4.22 odpovídají výše diskutovanému výběrovému souboru b). Patrné je zkrácení doby prvního ohřevu startéru po přivedení napájecího napětí na svítidlo v sériové větvi DUO kompenzace.



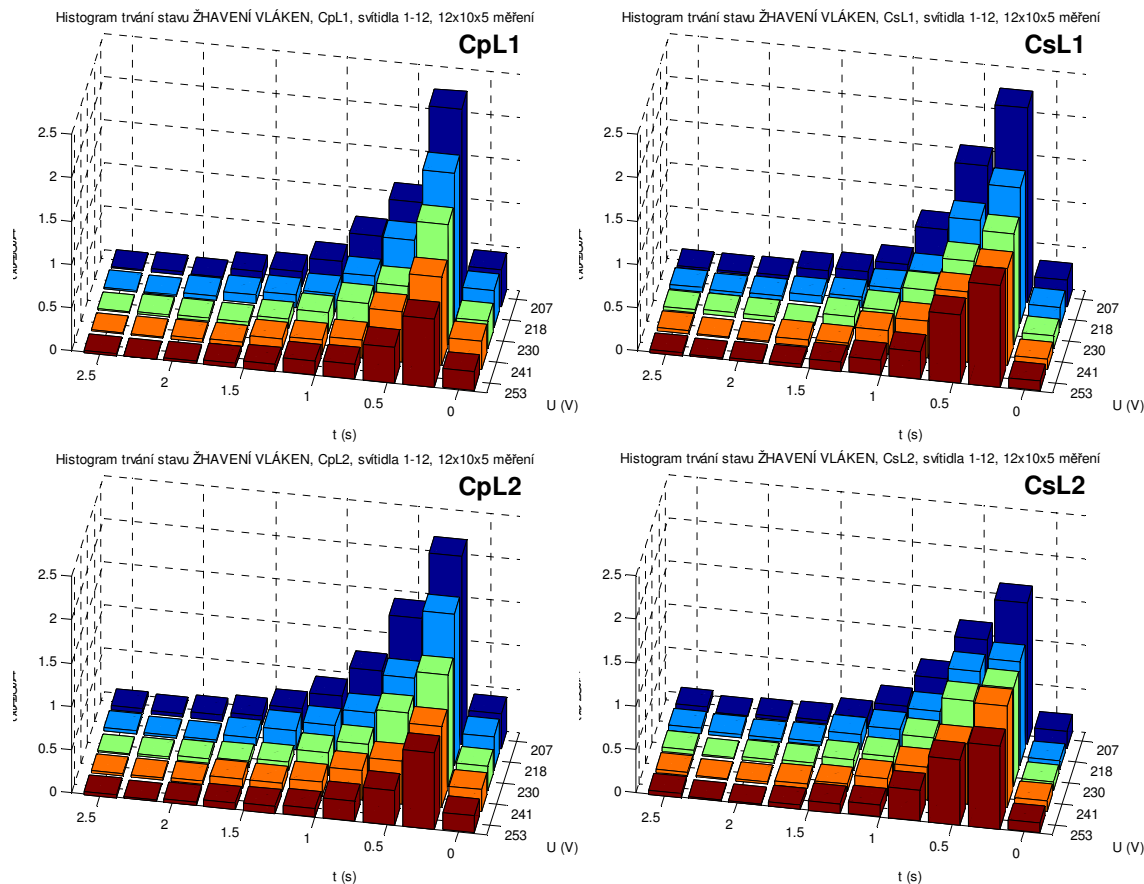
Obrázek 4.22: Četnost doby **trvání stavu „ohřev startéru“** během jednoho startu **svítidla 11** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

4.4.2 Žhavení

Trvání stavů žhavení, jak vyplývá z histogramů na obr. 4.23, je pro sériovou větev DUO kompenzace mírně delší než u kompenzace paralelní. Výjimkou jsou velmi krátká

žhavení zářivky pod 0,3 s. Těch je u sériové větve DUO kompenzace výrazně méně.

Zajímavé je srovnání s obr. 4.19. Při opakovaném žhavení dojde k ohřátí struktury startéru na vyšší teplotu, než je obvyklé, a žhavení pak trvá déle. Tento případ má úměrně menší četnost a souvisí s více pokusy o zapálení při nižším napájecím napětí.

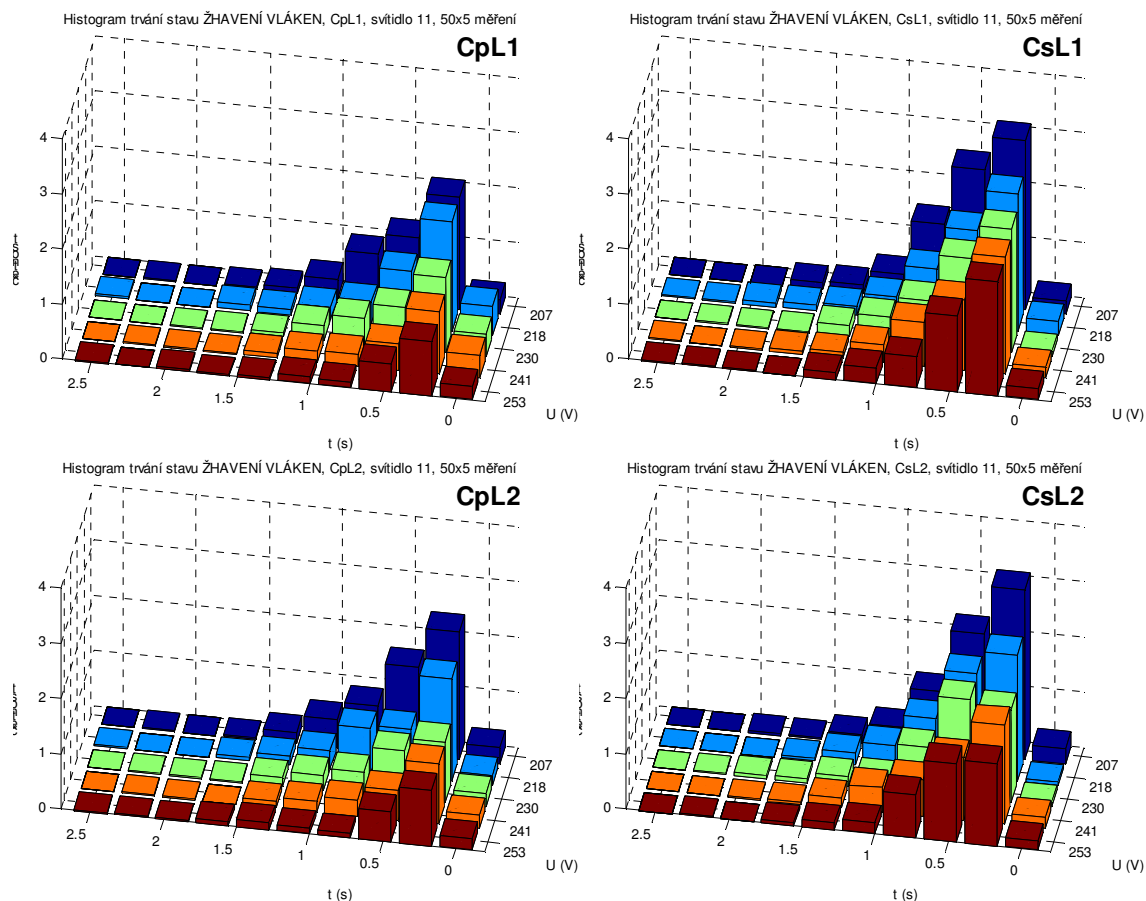


Obrázek 4.23: Četnost doby **trvání stavu „žhavení vláken trubice“** během 12×10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumičkou L1 a L2

Samotná doba žhavení je dána především konstrukcí startéru, přičemž záleží na čase, který je potřebný k vyzáření a odvedení tepla z prostoru startéru. Tomu odpovídá prohnutí bimetalového kontaktu startéru. Žhavící proud je v sériové větvi DUO kompenzace nižší, jak bylo uvedeno výše. Protože jsou zářivkové startéry sestaveny tak, aby za určitou dobu rozpojily žhavící obvod zářivky, pak za stejnou dobu, bude mít menší žhavící proud za následek nižší teplotu na předžhavení elektrod a zážeh zářivky při nedostatečně nažhavených elektrodách. Dochází tak k poškození emisní vrstvy elektrod v důsledku vytrhávání materiálu elektrickým polem a ke zkrácení životnosti zářivek. Úbytek napětí na katodě je při nízké teplotě totiž vyšší právě z důvodu nízké termoemise elektronů z elektrod. Naopak vyšší teplota předžhavení způsobuje

odpařování elektrod během předžhavení. Vliv velikosti žhavicího proudu na životnost zářivek byl popsán v kapitole 2.5.2 a je znázorněn na obrázku 2.25 na str.50.

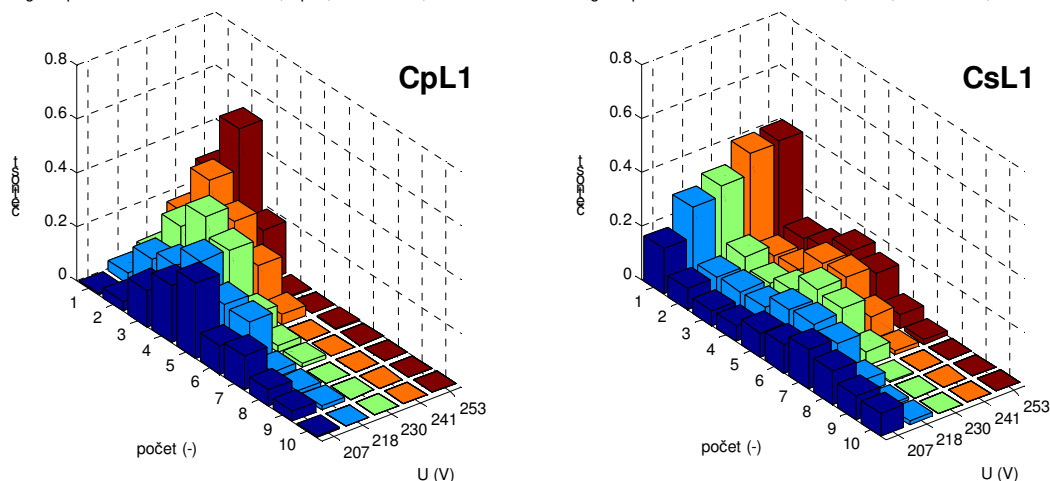
Na obr. 4.24 jsou uvedeny histogramy pro výběrový soubor a) jednoho svítidla. Zde je více patrný nárůst počtu žhavení u sériové větve DUO kompenzace.



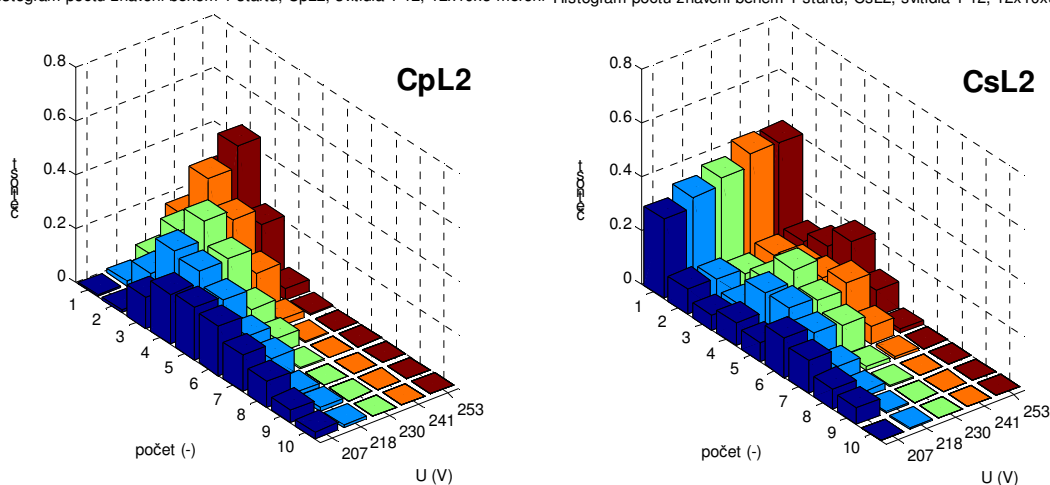
Obrázek 4.24: Četnost doby **trvání stavu „žhavení vláken trubice“** během jednoho startu **svítidla 11** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumičkou L1 a L2

Na obr. 4.25 jsou vyobrazeny histogramy počtu úseků žhavení během jednoho startu. Paralelní kompenzace zpravidla nestartuje napoprvé. Pro jmenovité napětí potřebuje cca 3 cykly žhavení. Naopak sériová větev DUO kompenzace s vysokou pravděpodobností startuje napoprvé, tj. s jedním cyklem žhavení během jednoho startu při jmenovitém napětí s pravděpodobností 30 %. Pokud se start na poprvé nepovede, je naopak počet žhavení větší než u paralelní kompenzace.

Histogram počtu žhavení během 1 startu, CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram počtu žhavení během 1 startu, CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Histogram počtu žhavení během 1 startu, CpL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram počtu žhavení během 1 startu, CsL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření

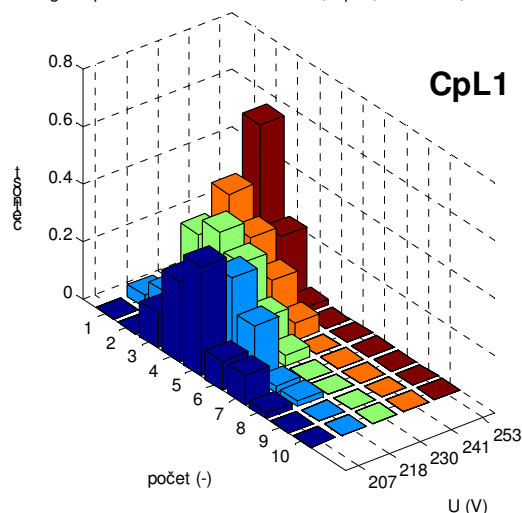


Obrázek 4.25: Četnost **počtů žhavení** během jednoho startu **zářivky**, ze 12×10 startů na **svítidlech 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

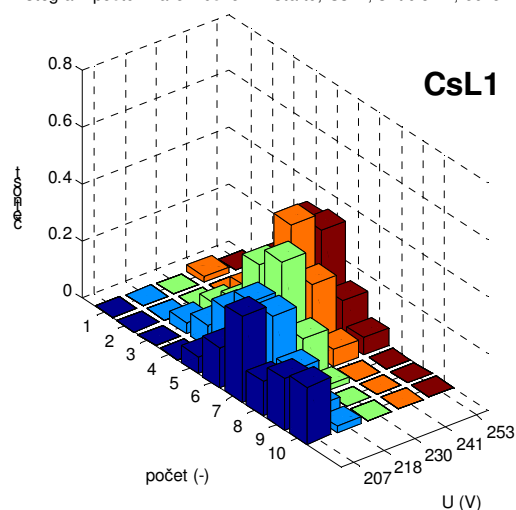
Na výsledcích pro výběrový soubor b) jedno svítidlo, je patrné zvýšení počtů fází žhavení během jednoho startu u paralelní kompenzace s tlumivkou kategorie B (L2) oproti zapojení s tlumivkou kategorie C (L1). V sériově kompenzované větvi je posun počtu žhavení na jeden start mezi tlumivkami menší a opačný.

Z obou výběrových souborů je zjevný nárůst počtu žhavení s klesajícím napájecím napětím.

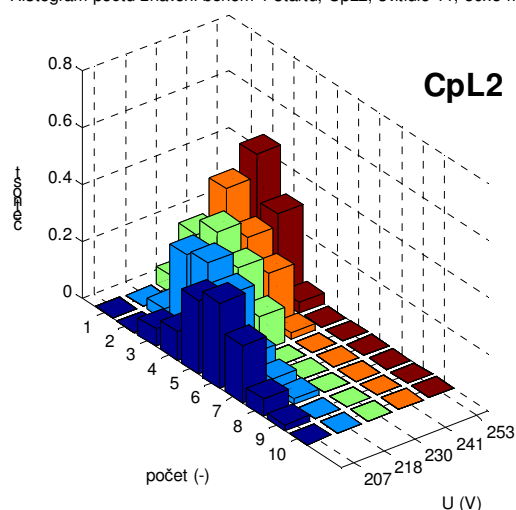
Histogram počtu žhavení během 1 startu, CpL1, svítidlo 11, 50x5 měření



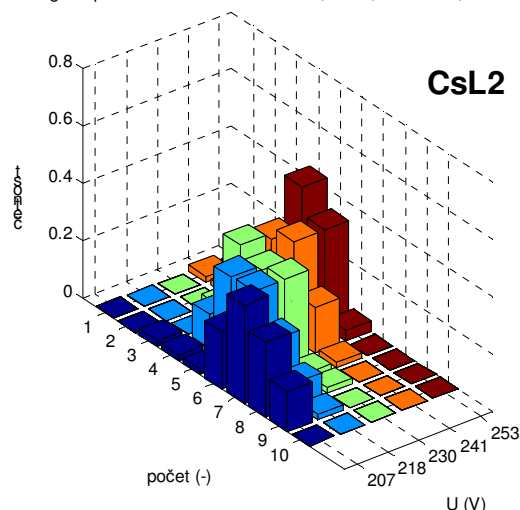
Histogram počtu žhavení během 1 startu, CsL1, svítidlo 11, 50x5 měření



Histogram počtu žhavení během 1 startu, CpL2, svítidlo 11, 50x5 měření



Histogram počtu žhavení během 1 startu, CsL2, svítidlo 11, 50x5 měření

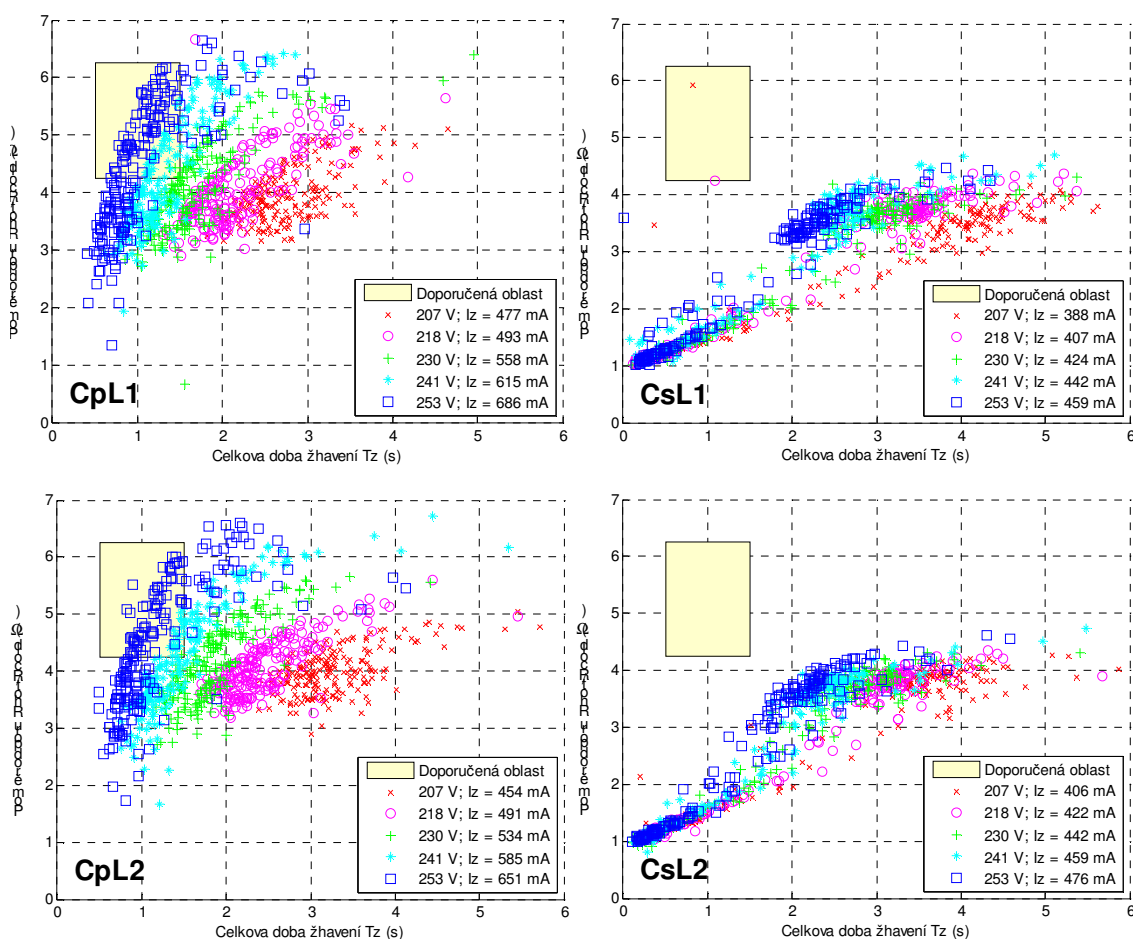


Obrázek 4.26: Četnost **počtů žhavení** během jednoho startu zářivky na **svítidle 11** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumičkou L1 a L2

Na obr. 4.27 je vynesena závislost poměru odporu teplé a studené elektrody zářivky R_H/R_C v závislosti na celkové době žhavení. Odpor elektrody byl zjištěn ze zaznamenaných oscilogramů. Odpor studené elektrody byl analyzován z prvních 60 ms po začátku prvního žhavení po připojení napájecího napětí. Obdobně odpor za tepla byl zjištěn z 60 ms při posledním úseku žhavení těsně před definitivním zapálením výboje zářivky. Úbytek napětí na elektrodách byl zjištěn jako rozdíl napětí na zářivkové trubici a napětí na startéru, čili na druhých vývodech elektrod zářivky. Úbytek je tak určen pro obě vlákna, zapojena do série. Proud tekoucí elektrodami při žhavení byl měřen přímo. Z napětí a proudu byla v každém vzorku oscilogramu vypočtena okamžitá hodnota odporu elektrody. Takto vyjádřený odpor elektrody je poměrně stabilní, mimo oblasti

průchodu proudu a napětí nulou. Pro grafy byl použit medián jako střední hodnota reprezentující odpor elektrody.

Do grafů je zanesena i doporučená oblast žhavení podle [Wak07a].



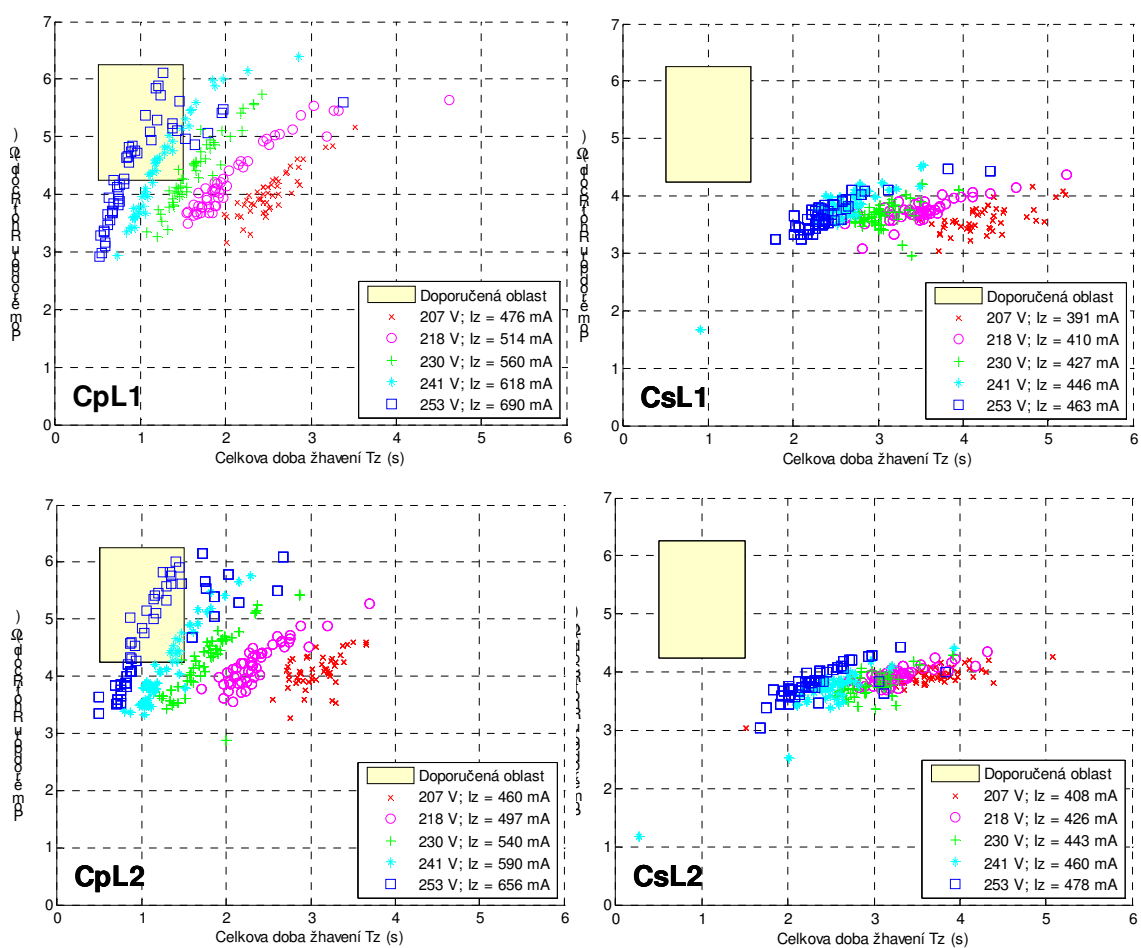
Obrázek 4.27: Poměr odporu R_H/R_C v závislosti na celkové době žhavení pro soubor **svítidel 1÷12** pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

Z obrázků je patrné, že zářivka při paralelní kompenzaci není zapálena, pokud poměr odporů nepřekročí hodnotu cca 3. Výjimkou jsou starty s napájecím napětí 253 V, kde dochází, díky vyššímu napětí, ke startům s nedostatečně nažhavenými elektrodami.

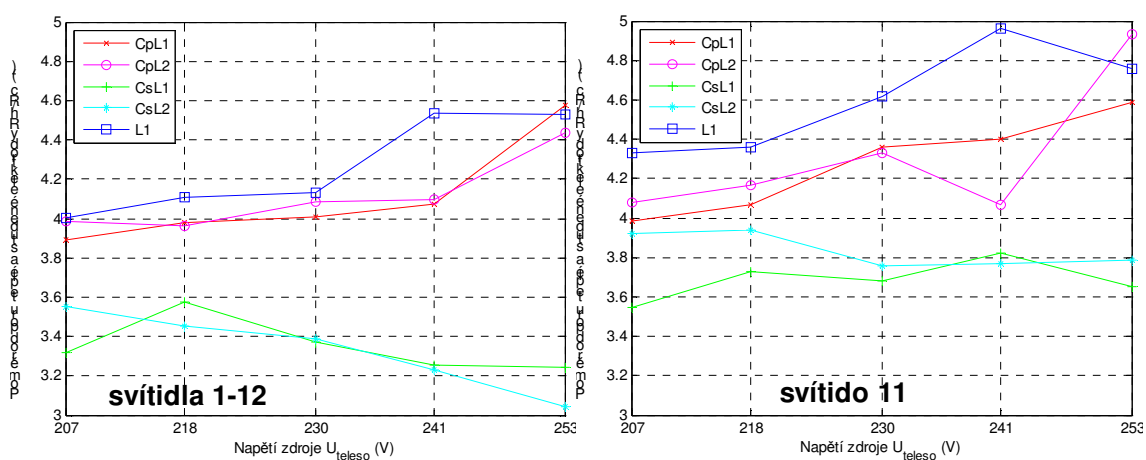
V případě sériové větve DUO kompenzace, je třetina startů provedena s velmi málo nažhavenými elektrodami. Důsledkem je snížení doby života zářivek provozovaných se sériovou kompenzací účinníku.

Na obr. 4.28 jsou výsledky pro výběrový soubor b) jedno svítidlo. Výsledky odpovídají výběrovému souboru a). U sériové kompenzace prakticky chybí zápaly na

poprvé s nedostatečným nažhavením.



Obrázek 4.28: Poměr odporu R_H/R_c pro v závislosti na celkové době žhavení pro **svítidlo 11**, oba typy kompenzace účinníku s tlumičkou L1 a L2



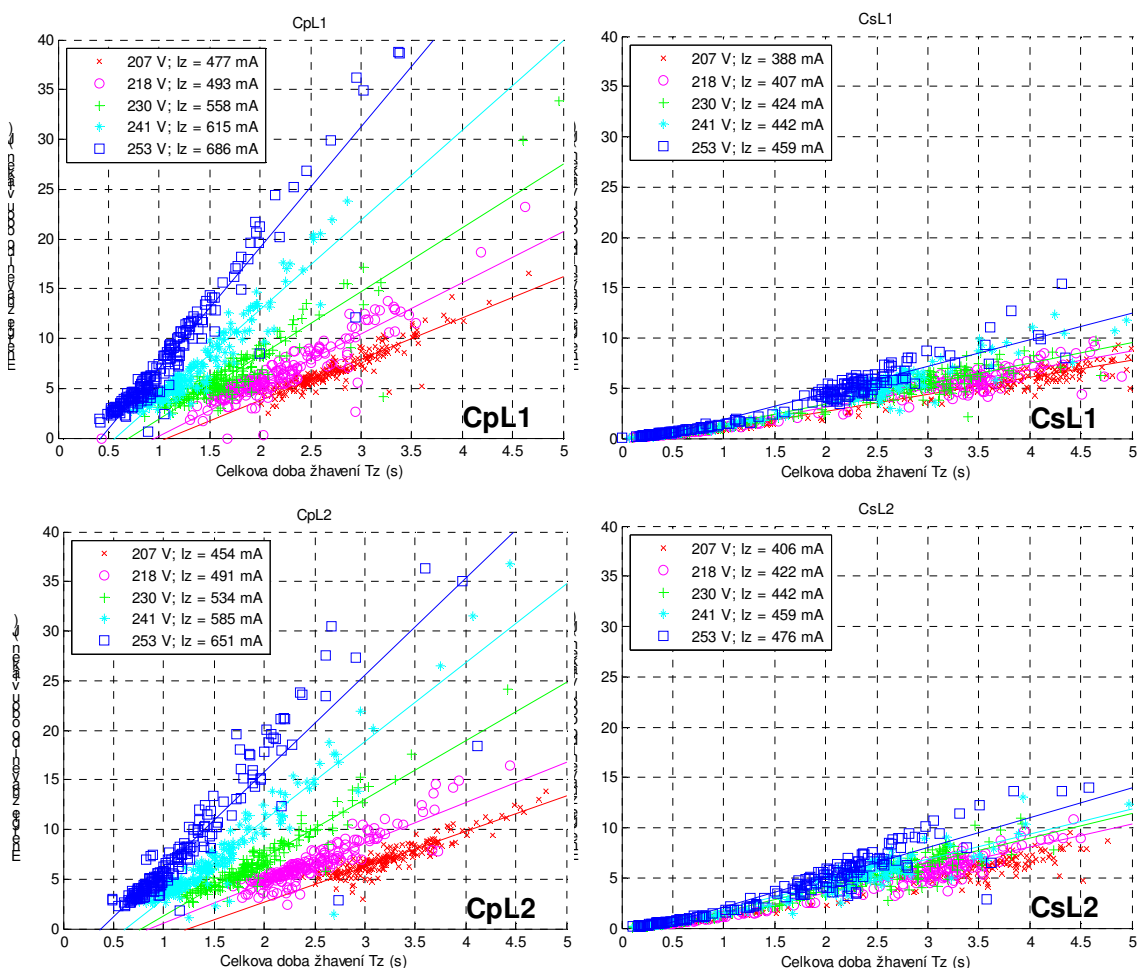
Obrázek 4.29: Závislost poměru odporů teplé a studené katody R_H/R_c (na počátku a na konci startu zářivky) na napájecím napětí pro různé

způsoby kompenzace účinníku, vlevo výběrový soubor **svítidla 1÷12** ($10 \times 12 \times 5 \times 5$ měření), vpravo výběrový soubor **svítidlo 11** ($50 \times 5 \times 5$ měření)

Nažhavení elektrody před zapálením výboje zářivky je klíčové pro zachování dlouhé doby života. Na obr. 4.29 je zobrazena závislost středních hodnot poměru odporu R_H/R_C na napájecím napětí pro testovaná zapojení. Úroveň předžhavení je vyšší a blíží se více optimu u paralelní kompenzace.

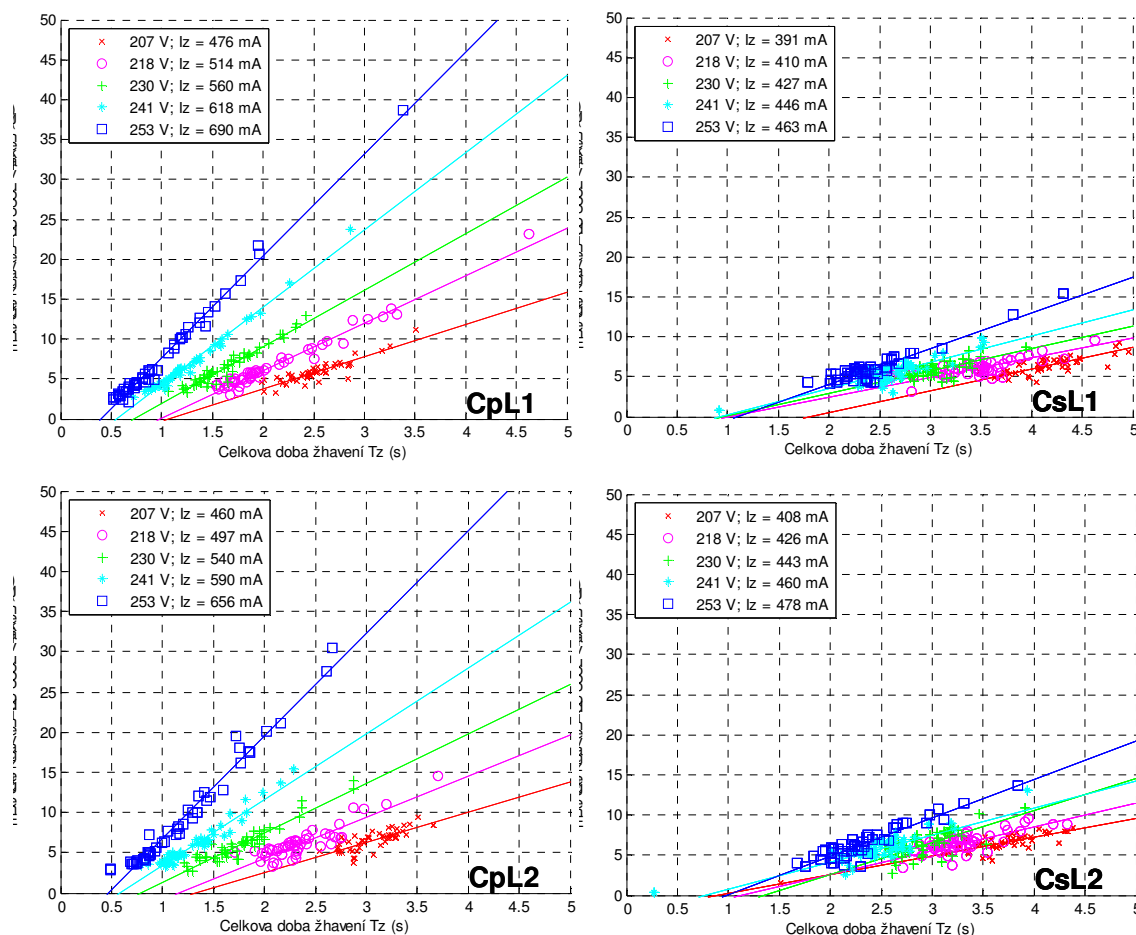
U sériové kompenzace je trend závislosti na napětí opačný. Se vzrůstajícím napětím úroveň nažhavení klesá, což není pro zářivku dobré. S rostoucím napětím totiž roste gradient elektrického pole v okolí elektrody, který podporuje vytrhávání materiálu termoemisní vrstvy.

Zajímavé je i porovnání energií dodaných do elektrod při žhavení, viz obr. 4.30. U sériové kompenzace je energie nažhavení mnohem méně závislá na napájecím napětí.



Obrázek 4.30: Energie žhavení pro soubor **svítidel 1÷12** v závislosti na celkové době žhavení pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

U výběrového souboru b), jedna trubice, opět chybí pro sériovou kompenzaci zapálení s nedostatečným předžhavením.

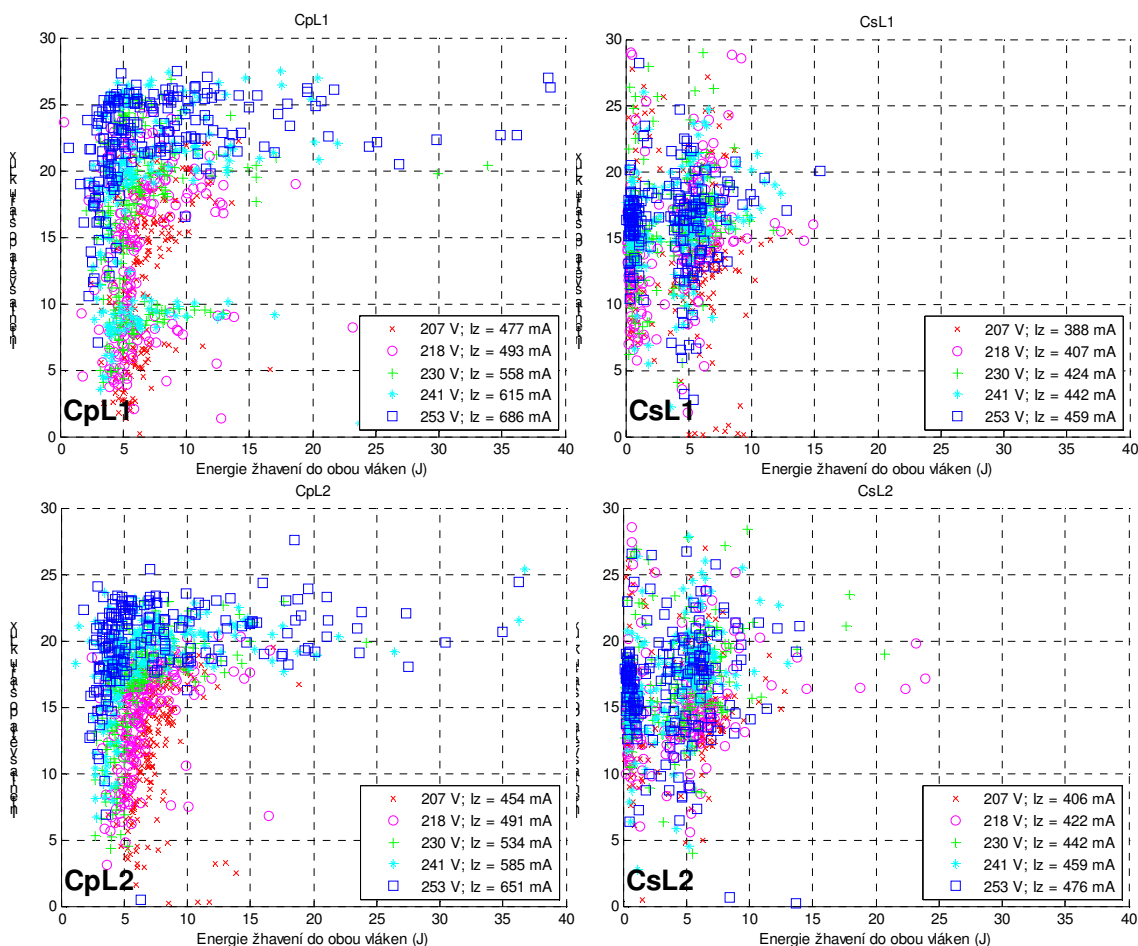


Obrázek 4.31: Energie žhavení pro **svítidlo 11** v závislosti na celkové době žhavení pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

Kvalitativním hodnocením správného předžhavení může být intenzita generovaného světla zářivkou, těsně po zapálení výboje. Intenzita světla byla vyhodnocena jako střední hodnota z 20 ms těsně po zapálení výboje. Na obr. 4.32 u paralelní kompenzace účinníku je dobře patrné, že v případech startu s nízkou energií dodanou do elektrod při žhavení, intenzita světla rychle klesá. Z oscilogramů je patrné, že se výboj rychle stabilizuje a začne dosahovat takřka normálních hodnot intenzity osvětlení už ve třetí periodě po zapálení výboje. Výjimkou jsou případy s nedostatečně

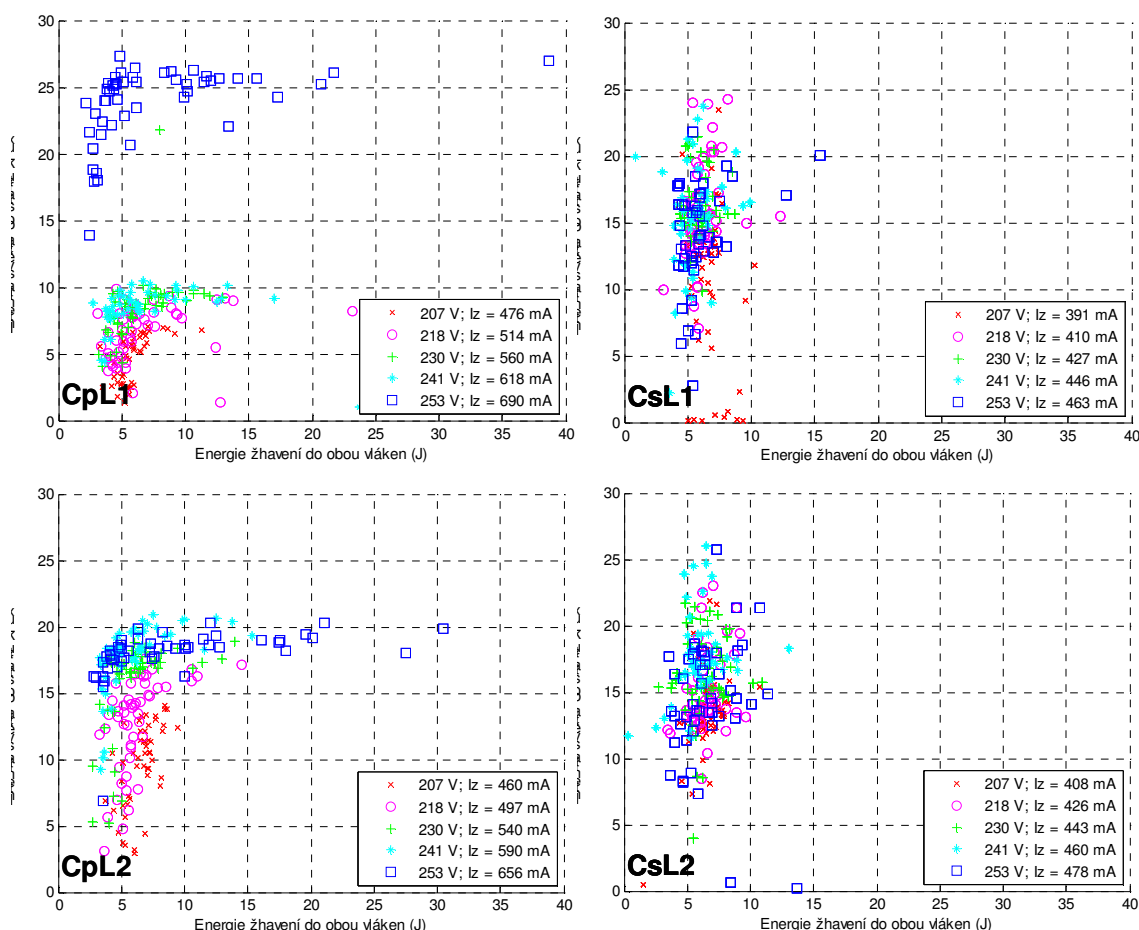
nažhavenými elektrodami, kde ke stabilizaci výboje dochází desítky period. V případě s tlumivkou L1, jsou patrné dvě odloučené oblasti pro nižší hodnoty napětí. Hodnoty s intenzitou generovaného světla pod 10 kLux jsou způsobeny svítidly č. 11 a 12.

Intenzita generovaného světla u sériové kompenzace téměř nezávisí na napájecím napětí. Obsahuje opět dvě oblasti. Část hodnot odpovídajících zápalům s nízkým předžhavením s energií žhavení $< 2,5$ J.



Obrázek 4.32: Intenzita osvětlení pro soubor **svítidel 1÷12** v závislosti na celkové energii žhavení obou vláken pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

Data pro výběrový soubor a) jedno svítidlo na obr. 4.33 dokládají, že oblast s nízkou intenzitou generovaného světla pro zapojení CpL1 odpovídá skutečně svítidlu 11. Obdobně u sériové kompenzace zde chybí hodnoty s nízkou energií předžhavení. Lze tedy konstatovat, že parametry komponent svítidla 11 se liší od ostatních svítidel.



Obrázek 4.33: Intenzita osvětlení pro **svítidlo 11** v závislosti na celkové energii žhavení obou vláken pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

4.4.3 Svícení

Při startování zářivkového svítidla může nastat situace, kdy se výboj v zářivce neudrží. Zářivka se tak nerozsvítí a dochází k opětovnému ohřevu startéru. Neúspěšné úseky stavu „svícení“, respektive četnosti délky jejich trvání, jsou zachyceny na histogramech na obr. 4.34, ze kterých plyne, že tyto krátké záblesky trvají od 1/6 do 1 periody napájecího napětí.

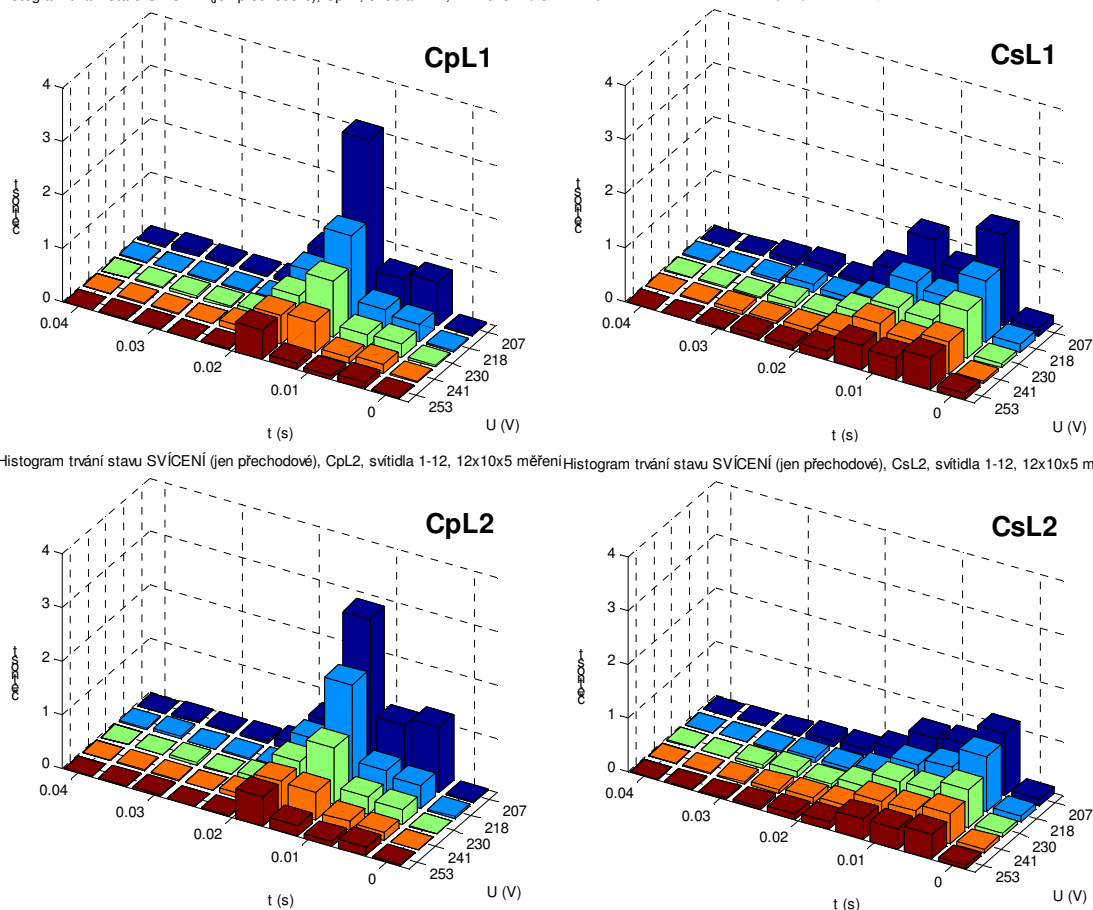
Samozřejmé je, že na konci startovacího procesu byla trubice u každého provedení měření na nových zářivkových trubicích rozsvícena. Svícení pak trvalo do ukončení vzorkování dat. Tyto úseky byly vždy delší jak jedna sekunda.

Ve všech případech je zjevná závislost na napájecím napětí svítidla, kde roste počet neúspěšných startů a celková doba startu zářivky.

U paralelní kompenzace odpovídají tyto krátké záblesky neúspěšným zápalům zářivky, a také zapálení výboje s nedostatečným nažhavením elektrod, kde dochází k

přerušování hoření výboje těsně po jeho zapálení. Střídají se tak stavy „svícení“ a „ohřev startéru“. Vlákna jsou dožhávána kolizemi iontů z výbojového kanálu, a během několika period dochází k rychlé stabilizaci výboje. Při poklesu proudu výbojovým kanálem má při tom výboj tendenci zhasnout.

Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měřeníHistogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření

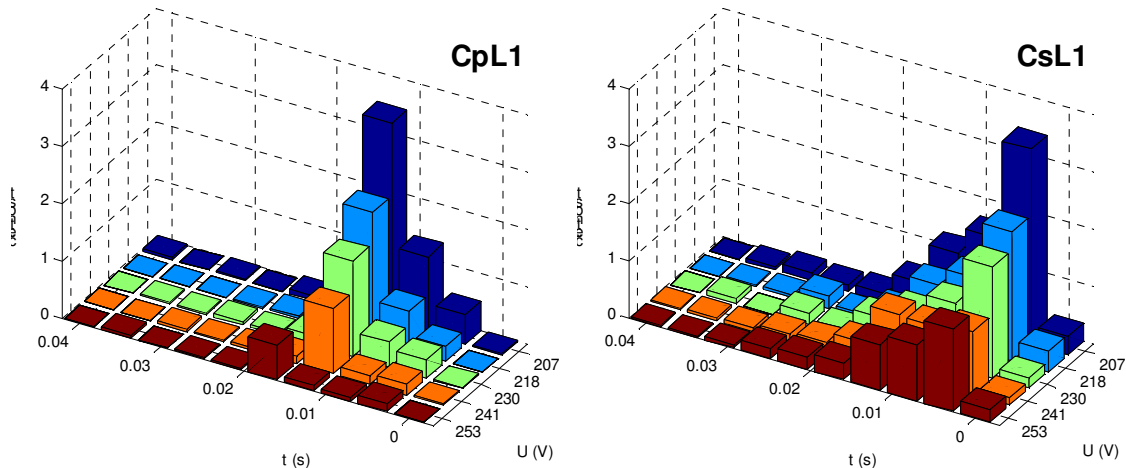


Obrázek 4.34: Četnost doby **trvání stavu „svícení“** během 12×10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

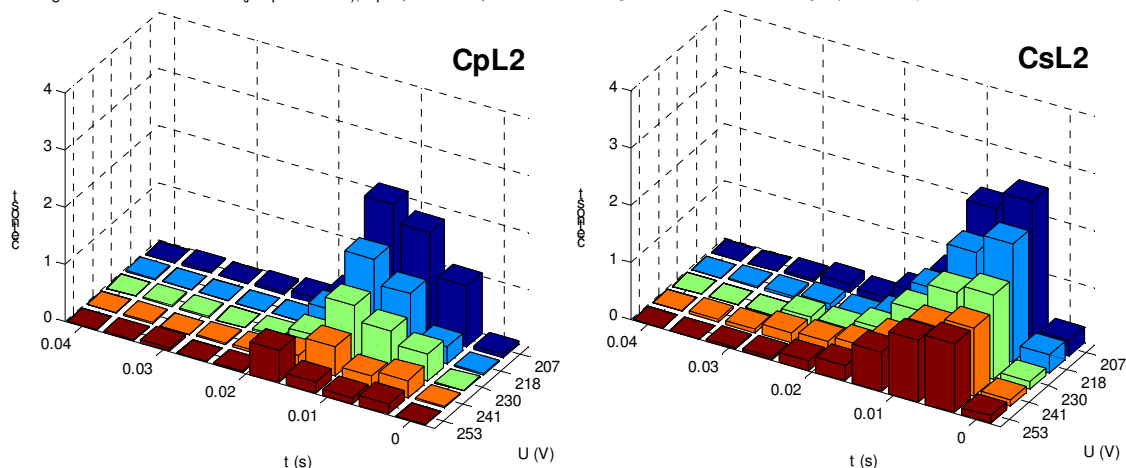
V sériově kompenzované větvi DUO zapojení se častěji vyskytují krátké záblesky svícení zářivky, způsobené ztrátou spojení na bimetalových kontaktech startéru. Mechanismus byl již diskutován v kapitole Ohřev startéru. Tyto záblesky mají kratší dobu trvání než částečné hoření výboje při běžném neúspěšném startu. To je dobře patrné na histogramech nárůstem četností trvání záblesků svícení pod 0,01 s, tedy poj $\frac{1}{2}$ periody napájecího napětí.

Na obr. 4.35 jsou zobrazena data pro výběrový soubor a) jedno svítidlo. Výsledky odpovídají výběrovému souboru b). V sériové větvi DUO kompenzace narostl, oproti výběrovému souboru b), podíl velmi krátkých záblesků svícení $<0,01$ s.

Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CpL1, svítidlo 11, 50x5 měření Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CsL1, svítidlo 11, 50x5 měření



Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CpL2, svítidlo 11, 50x5 měření Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CsL2, svítidlo 11, 50x5 měření



Obrázek 4.35: Četnost doby **trvání stavu „svícení“** během jednoho startu **svítidla 11** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

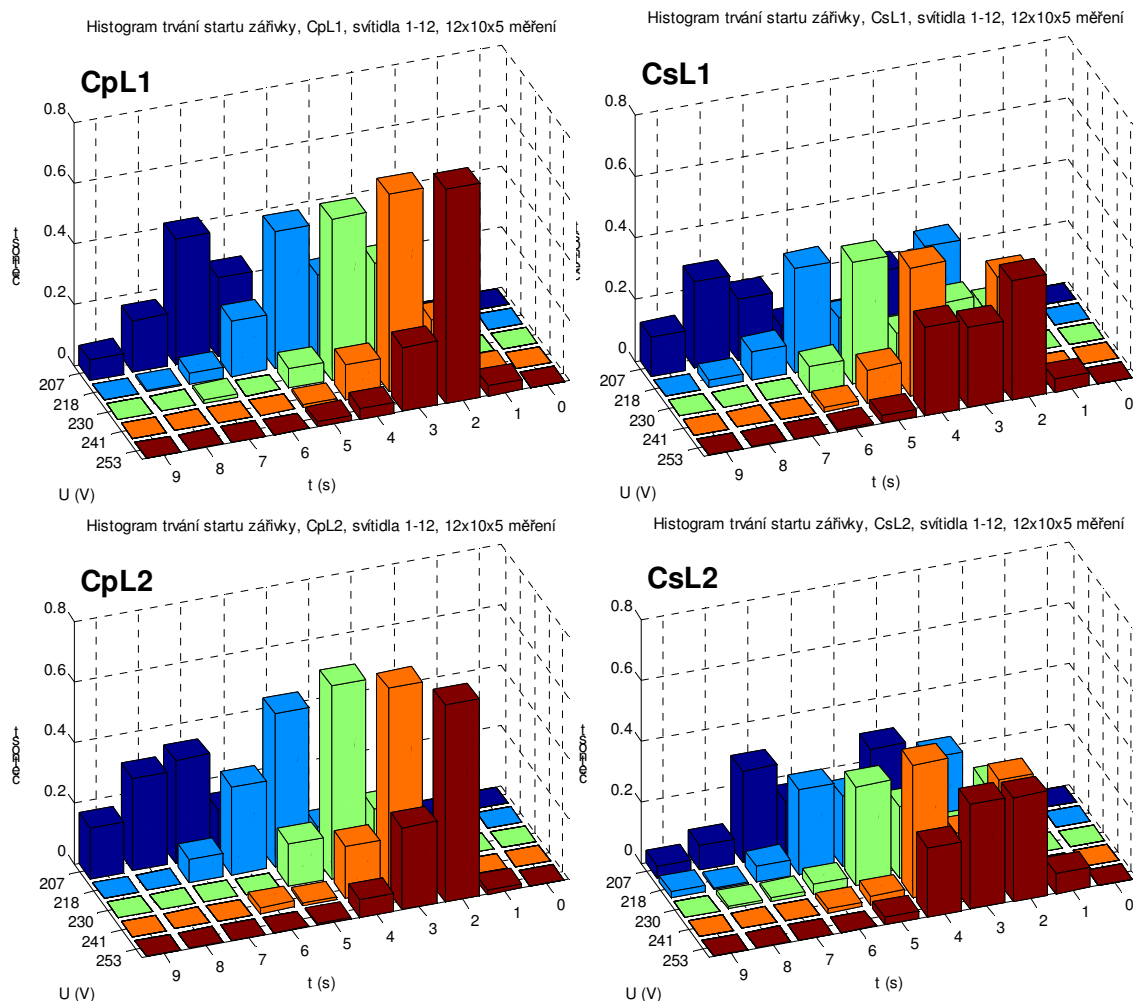
U zapojení s paralelní kompenzací účinníku je lépe patrný rozdíl mezi použitím tlumivky kategorie C (L1), kde jsou záblesky mírně delší, než při zapojení s tlumivkou kategorie B (L2).

4.4.4 Celková doba trvání startu zářivky

Celková doba startu zářivky je uvedena na histogramech na obr. 4.36. Délka startu významně závisí na napájecím napětí, a to u všech zapojení. Zapojení s paralelní kompenzací mají menší rozptyl doby trvání startu. Přestože průměrně při jednom startu

dochází ke třem žhavením, je celková doba zapálení zářivky překvapivě vyrovnaná. U sériové větve DUO kompenzace je rozptyl doby startu větší. Navíc střední hodnota je posunuta – starty jsou cca o sekundu pomalejší.

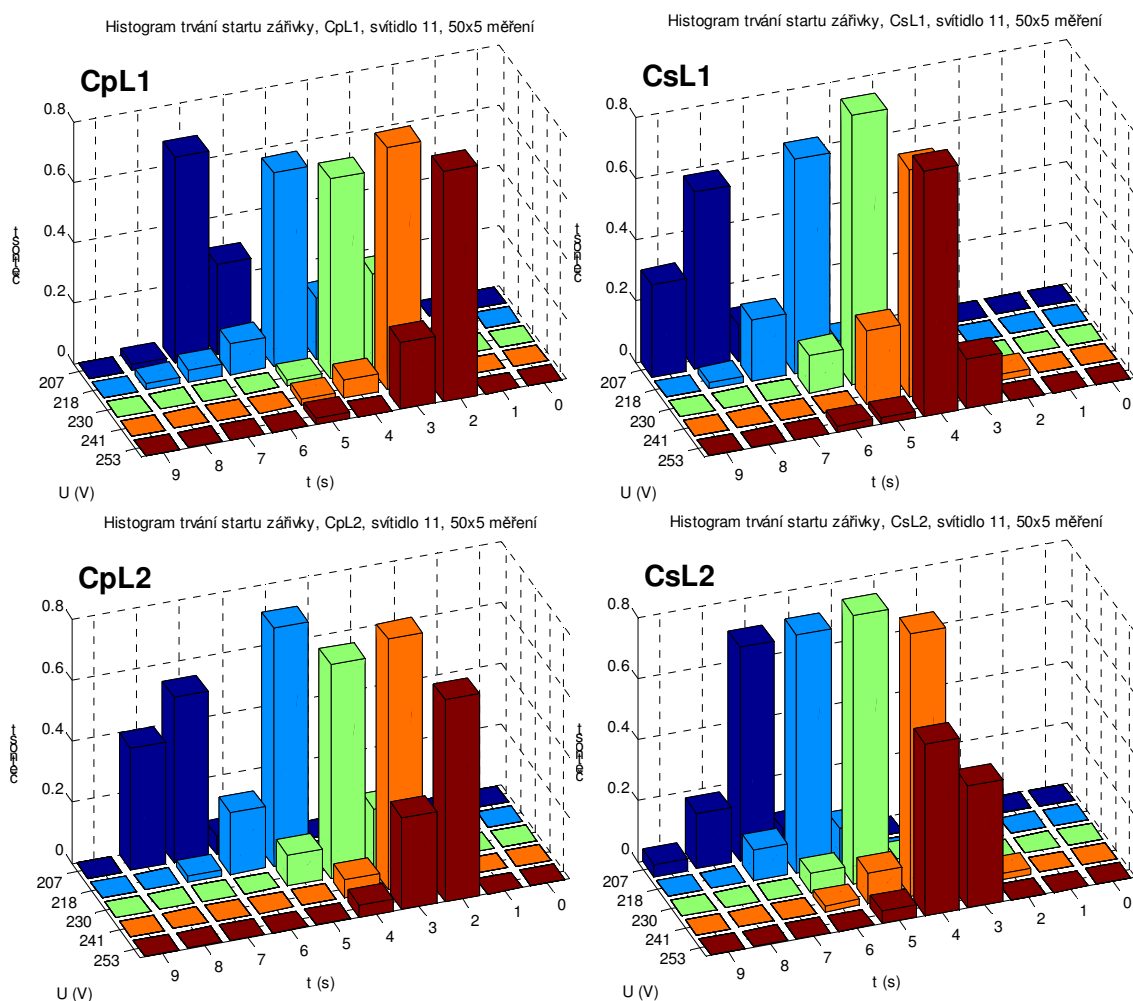
Nejdelším stavem celého rozsvěcování je doba prvního ohřevu startéru po připojení napájení, která je přitom pro oba typy kompenzace téměř totožná stejně tak, jako doba trvání prvního žhavení vláken trubice. Rozdíl je způsoben výrazně větším počtem zapalovacích cyklů u zářivky se sériovou kompenzací.



Obrázek 4.36: Četnost celkové doby **startu zářivky** během 12×10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

U výběrového souboru a) jsou výsledky zobrazeny na obr. 4.37. Oproti výběrovému souboru b) 12 svítidel, je patrný výrazný pokles rozptylu celkové doby trvání startu zářivky. Rozptyl není způsoben samotným procesem startování, ale variací parametrů

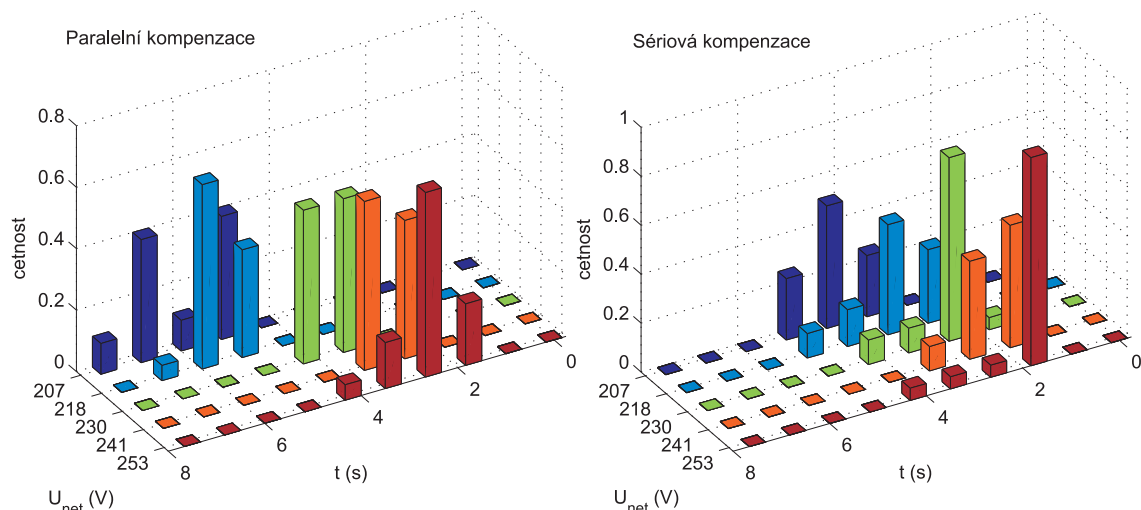
komponent jednotlivých svítidel mezi sebou. Vysvětlením může být rozdílné opotřebování jednotlivých svítidel.



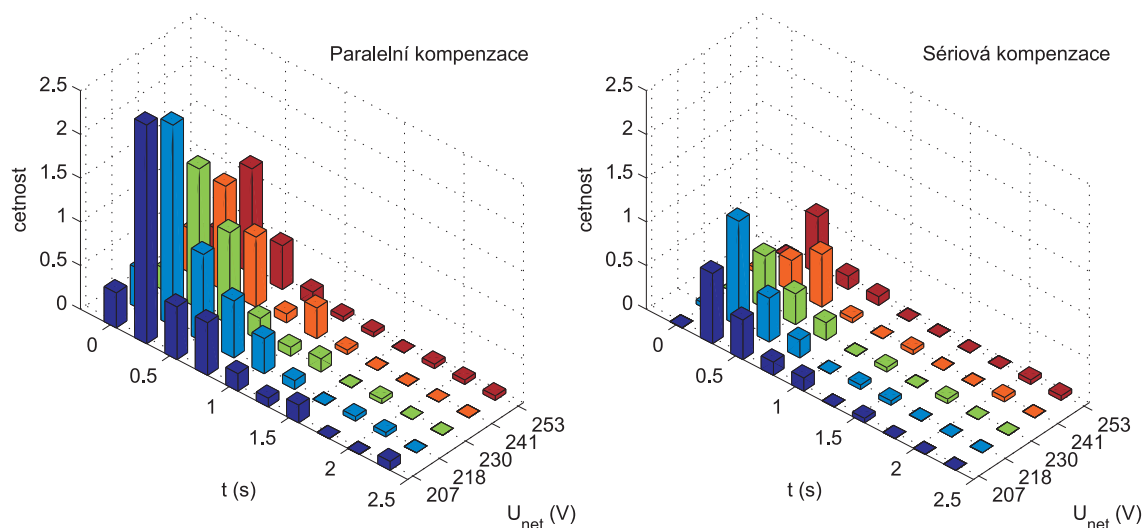
Obrázek 4.37: Četnost doby **startu zářivky** během jednoho startu **svítidla 11** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou $L1$ a $L2$

Měření uvedená v této práci byla prováděna na modelu osvětlovací sítě v laboratoři TUL. Tento model byl pořízen v roce 2004. Následně na něm byla prováděna měření s nevelkým počtem startů. Intenzivnější využití přišlo až v roce 2006, kdy jsem na modelu prováděla systematická měření startů zářivek pro článek [Nov06]. Při tomto měření byla zatížena pouze svítidla č.11 a 12 cca 500 starty. Následně, v rámci diplomové práce Milana Diviše [Div08], byla každá trubice zatížena dalšími cca 500 starty a trubice č.11 a 12 dvojnásobkem. Poté se na přelomu roku provádělo ověřovací měření, kdy byly trubice zatíženy dalšími cca 1000 starty. Porovnáme-li výsledky

změřené pro tuto práci s daty naměřenými při prvních měřeních startů, dojdeme k zajímavému zjištění. Zatímco průběh a doba trvání startu se u paralelní kompenzace příliš nezměnily, u sériové kompenzace došlo k výraznému nárůstu počtu žhavicích cyklů a celkové doby startu zářivky, viz obr. 4.38 a obr. 4.39 publikovaný v [Nov06].



Obrázek 4.38: Četnost doby **startu zářivky** během jednoho startu **svítidla 11÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1, 2×10 měření, původní měření z roku 2006 [Nov06]



Obrázek 4.39: Četnost doby **žhavení vláken zářivky** během jednoho startu **svítidla 11÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy

kompenzace účinníku s tlumivkou L1, 2×10 měření, původní měření z roku 2006 [Nov06]

Přestože tehdejší verze vyhodnocovacího algoritmu byla značně odlišná, je evidentní, že došlo k opotřebování komponent svítidel. Celková doba trvání startu je totiž oběma algoritmy vyhodnocena stejně bezchybně. Také stav žhavení lze detekovat snadno a prvotní algoritmus ho detekoval správně.

Zatímco u prvotního měření [Nov06] startovala větev se sériovou kompenzací nejčastěji s jedním žhavicím stavem, tj. napoprvé (např. při jmenovitém napětí dosahuje úspěšnost startů na poprvé 63 %), tak v sadě měření, vyhodnocované v této práci, klesla úspěšnost startů na poprvé na 30 %.

Podrobnějším studiem oscilogramů bylo zjištěno, že dramaticky narostl počet odskoků kontaktů doutnavkového startéru a rovněž stavy krátkého svícení s přechodem do žhavení u sériové kompenzace. Došlo zjevně k narušení povrchu kontaktů startéru.

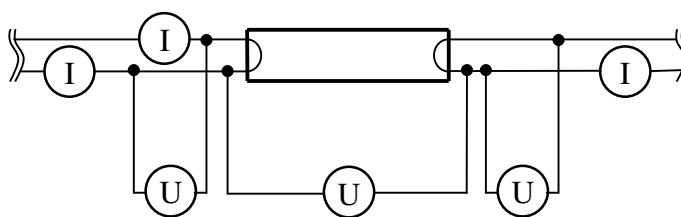
Opotřebování termoemisní vrstvy elektrod zářivky je také možné. Zářivky č.11 a 12 byly před tímto měřením vystaveny cca 2500 startům, což odpovídá 38 % životnosti podle standardní testovací procedury (3 h zapnuto, 15 min vypnuto). Konce trubic ovšem nejeví nejmenší známky zčernání. Navíc startování při paralelní kompenzaci účinníků vykazuje téměř stejné hodnoty jako v prvotním měření.

Hlavní problém tedy spočívá v degradaci startéru a zvýšení počtu odskoků kontaktů. Sériová kompenzace je na tyto odskoky mnohem citlivější a proto došlo k prodloužení startů.

5 Měření startů zářivky s elektronickým předřadníkem

Pro porovnání a vyhodnocení výsledků při procesu startu zářivky bylo provedeno měření startů zářivky i s elektronickým předřadníkem. Oproti měření startů zářivky s elektromagnetickým předřadníkem, kde byl použit multikanálový přístroj EMU se 16 kanály dat, představujících všechna napětí a proudy ze svítidla, se pro toto měření použil analyzátor výkonů NORMA 5000 s využitím pouze 2 kanálů současně, aby byla zajištěna co nejvyšší vzorkovací frekvence.

Schéma zapojení:



Obrázek 5.1: Měření proudů a napětí během startovacího procesu zářivky s elektronickým předřadníkem

Seznam použitých přístrojů:

Výkonový analyzátor	NORMA 5000, výrobce LEM
Programovatelný AC zdroj	CHROMA MODEL 61705 230 V/50 Hz
PC	
Trubice	PHILIPS MASTER TLD 36 W/840
Digitální předřadník	TRIDONIC PC 2 x 36 E011
Elektronický předřadník	HELVAR FINLAND EL2 x 36 HF
	220 ÷ 240 V, 50 ÷ 60 Hz

Pro každý start zářivky, kterých proběhlo celkem 10, byla změřena napětí a proudy vláken i tělesa dle schématu na obrázku 11. 1. Frekvence generovaná předřadníkem je proměnná a dosahuje až 50 kHz.

Naměřené oscilogramy posloužily jako vstupní hodnoty skriptu v jazyce MATLAB, určenému pro vyhodnocení vlastností startu zářivky s elektronickým předřadníkem. Skript⁸ vyhodnocuje dobu trvání žhavení, energii dodanou do elektrody při žhavení, odpor vláken na začátku a konci žhavení.

⁸ Skript vytvořený v jazyce MATLAB a popsáný v kapitole 8 je určen pouze pro vyhodnocení startů zářivky s elektromagnetickým předřadníkem.

Konec doby žhavení t_z byl určen v oscilogramu, a to podle velikosti úbytku napětí na žhavicím vlákně, přičemž hodnota této limitu byla nastavena na 14 V. Konec fáze žhavení byl tak definován poslední hodnotou, u které došlo k překročení uvedené úrovně.

K výpočtu energie žhavení se použil vzorec pro integraci okamžitého výkonu po dobu žhavení, tj.

$$E = \int_0^{t_z} (u \cdot i) dt \quad (5.1)$$

Odpor vláken na začátku a na konci žhavení byl určen jako medián hodnot odporů vypočtených z okamžitých hodnot úbytku napětí a proudu žhavicím vláknem třech period proudu po začátku žhavení a těsně před koncem žhavení.

Získané hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách 5.1, všechny naměřené hodnoty pak v příloze 7.4.

Tabulka 5.1: Výsledné hodnoty jednotlivých veličin definujících start zářivky s elektronickým předřadníkem

žhavení levého vlákna = KANÁL 1			žhavení pravého vlákna = KANÁL 2		
veličina x		$\bar{x} \pm \delta x$	veličina x		$\bar{x} \pm \delta x$
t_z	[s]	$0,997 \pm 0,000$	t_z	[s]	$0,995 \pm 0,000$
E	[J]	$1,478 \pm 0,012$	E	[J]	$1,373 \pm 0,013$
R_C	[Ω]	$2,148 \pm 0,037$	R_C	[Ω]	$1,918 \pm 0,027$
R_H	[Ω]	$8,254 \pm 0,056$	R_H	[Ω]	$7,490 \pm 0,068$
R_H / R_C	[-]	$3,857 \pm 0,058$	R_H / R_C	[-]	$3,909 \pm 0,040$

Správnosti hodnoty energie potřebné pro předžhavení elektrod lze přibližně ověřit z měrné tepelné kapacity wolframového vlákna a využít tak vztahu 2.4, tedy

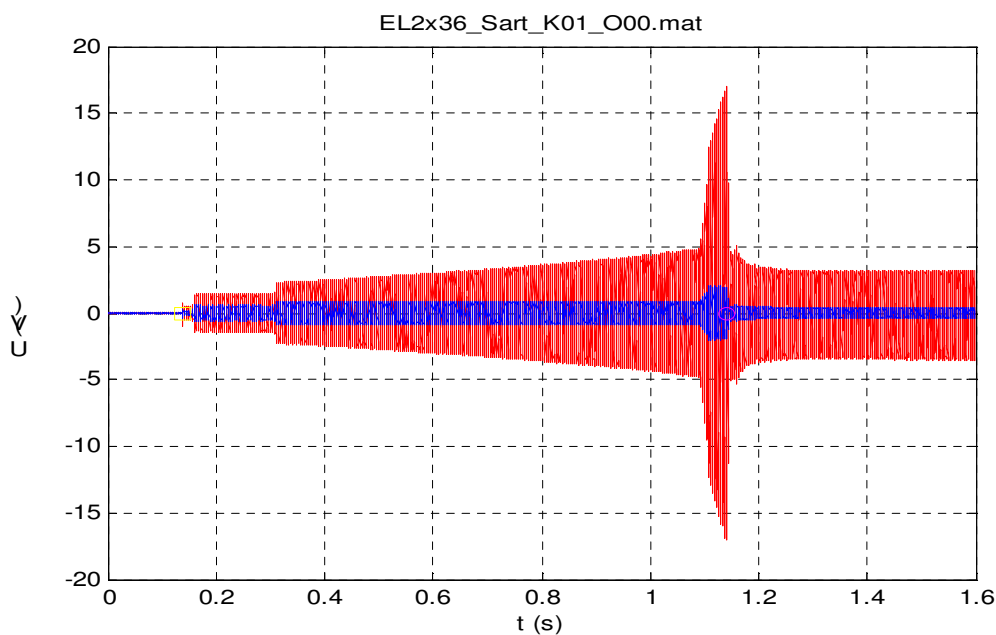
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = W = P \cdot t \quad (5.2)$$

kde Q je množství tepla obsažené na elektrodě
 c je měrná tepelná kapacita materiálu elektrody v $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ a pro wolframové vlákno je rovna $134 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
 m je hmotnost elektrody
 ΔT je rozdíl teploty ohřátého vlákna elektrody a jeho výchozí teploty
 P je výkon
 t je doba žhavení.

Vezmeme-li v úvahu rozdíl teplot 1000 K, je možné určit hmotnost vlákna

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{1,4}{134 \cdot 1000} = 0,0112 \text{ g} = 10,4 \text{ mg} \quad (5.3)$$

Pro porovnání bylo vlákno zváženo a jeho hmotnost činila 7,5 mg, z čehož lze usuzovat správnost výpočtu. Při hmotnosti 7,5 mg vychází energie cca 1 J. Tento přibližně 30 % rozdíl energie lze vysvětlit možným odvodem energie do masivních kovových držáků elektrody.



Obrázek 5.2: Oscilogram napětí a proudu při startovacím procesu zářivky s elektronickým předřadníkem

6 Závěr

V průběhu řešení této disertační práce byly změřeny starty zářivkových svítidel osazených elektromagnetickým předřadníkem ve dvou zapojeních a to s paralelní a DUO kompenzací účinníku. Zároveň byl zjišťován vliv energetické účinnosti tlumivky předřadníku na kvalitu startů zářivky. Cílem bylo objasnit, jaká topologie obvodu svítidla je optimální. Měření byla pro porovnání doplněna změřením startů zářivky s elektronickým předřadníkem.

Předpoklad, že start je vhodným procesem pro diagnostiku všech komponent svítidla, se potvrdil. Vzhledem k nevelkému opotřebení svítidla během měření, nebyly pozorovány žádné změny na parametrech kompenzačních kondenzátorů ani tlumivek předřadníků. To se nedalo ani očekávat, protože během měření byla osvětlovací soustava napájena umělým zdrojem napětí a nebyla tak vystavena přepětím. Rovněž teplota v laboratoři zdaleka nepřekračovala provozní podmínky těchto komponent.

Nejdůležitějším závěrem je srovnání startů při paralelní a duo kompenzaci účinníku. Obrovskou výhodou je, že jsem měla k dispozici výsledky z počátků mé práce, kdy byly komponenty svítidel nové a mohla jsem je tak porovnat se stavem po absolvování cca 2500 startů. Až toto srovnání objasnilo rozdíly ve startech svítidel obou typů kompenzace.

Sériová větev svítidla s DUO kompenzací startuje s vysokou pravděpodobností po prvním cyklu žhavení elektrod zářivky. Dochází tak k zapálení výboje zářivky s nedostatečně nažhavenými elektrodami s poměrem odporů teplé ku studené katodě $R_H/R_C < 2$, přitom optimální hodnota je $> 4,25$. Dále se v tomto zapojení vyskytuje větší počet nestandardních dějů, kde svítidlo přechází z fáze žhavení elektrod zářivky do svícení a zpět ke žhavení. Tento jev je zřejmě způsoben snížením strmosti nárůstu indukovaného napětí po rozpojení elektrod startéru vlivem sériově zapojeného kompenzačního kondenzátoru. Četnost těchto přechodů se s opotřebením startérů po cca 2500 cyklech zapálení zářivky zvětšila 13krát! Obdobně stoupla 8krát i četnost poruch nazývaných odskok kontaktů doutnavkového startéru. Díky tomuto opotřebení klesla úspěšnost startu na poprvé z 65 % na 30 % a výrazně se prodloužila celková doba startu zářivky. Zatímco s novými komponenty startovaly zářivky v sériové větvi DUO kompenzace rychleji než s paralelní kompenzací, po opotřebení startéru je start sériové větve pomalejší, zatímco u paralelní kompenzace zůstal počet cyklů žhavení a celková doba startu téměř nezměněna.

Důsledkem je, že s novými startéry startují zářivky v sériové větvi DUO kompenzace příliš rychle s nedostatečně nažhavenými elektrodami a s opotřebenými startéry startují pomalu. Současně narůstá vlivem poruch spojení bimetalových kontaktů startéru počet krátkých zápalů výbojového kanálu zářivky. Oba tyto mechanismy zvýšenou měrou opotřebovávají termoemisní vrstvu elektrod a zkracují dobu života zářivkové trubice. Lze tedy konstatovat, že standardní doutnavkové startéry S10 nejsou pro tento typ provozu vhodné.

Na druhou stranu má DUO kompenzace řadu výhod: snížení stroboskopického efektu, nižší závislost světelného toku na změnách napájecího napětí, větší odolnost proti krátkým výpadkům napájecího napětí, vysoká impedance předřadníku pro vř signály, obzvláště HDO, menší zkreslení odebíraného proudu THDi, odolnost proti oscilacím s parazitní indukčností napájecí sítě, dosahuje lepšího účinníku v místech připojení s větší impedancí napájecí sítě aj. To vše vede k menším ztrátám a úsporám provozních nákladů osvětlovacích sítí se svítidly v DUO zapojení. Zkrácení doby života při sériové kompenzaci je možno eliminovat použitím elektronického startéru, který z principu netrpí uvedenými poruchami.

Svítidla s paralelní kompenzací prokázala výbornou stabilitu zapalovacího procesu i s degradovanými startéry. Dobré předžhavení elektrod zářivky a stabilní doba zapálení jsou ve prospěch životnosti zářivkových trubic. U tohoto typu kompenzace je výraznější závislost kvality předžhavení na napájecím napětí. Při podpětí v napájecí síti -10 %, protíná úroveň předžhavení oblast optimálních hodnot, což bude mít za následek zvýšené opotřebování elektrod zářivky.

Vliv kategorie tlumivky v obou zapojeních kompenzace není výrazný. U svítidel s paralelní kompenzací došlo k mírnému zhoršení průměrného předžhavení elektrod, ale v sériové větvi DUO kompenzace naopak došlo ke zlepšení. Zapalování termomechanickým doutnavkovým startérem je značně citlivé na změny podmíněk.

Porovnávací měření na svítidle s elektronickým předřadníkem prokázalo vysokou stabilitu zapalovacího procesu. Úroveň předžhavení elektrod byla stabilní, mírně pod hranicí optimálních hodnot.

Provedená analýza startů tedy potvrdila předpoklady ovlivňující dobu života zářivkových trubic. Nejvhodnější jsou elektronické předřadníky, kde je úroveň předžhavení přesně definovaná a stabilní. Druhým v řadě je zapojení svítidel s elektromagnetickým předřadníkem s paralelní kompenzací účinníku, a tedy i nekompenzované větve v DUO zapojení, kde je předžhavení elektrod na dobré úrovni a

je stabilní i s degradovanými startéry. Nejhorších výsledků dosáhly sériově kompenzované větve v DUO zapojení. S novými startéry je předžhavení příliš krátké. S opotřebovanými startéry zde dochází ke zvýšenému počtu krátkých zápalů s nedostatečně nažhavenými elektrodami. To potvrzuje známý vliv na snížení doby života cca o 20-30 %.

DUO zapojení je tedy vhodné pro rozsáhlejší instalace s větším počtem svítidel tam, kde nejsou použity drahé kvalitní trubice a nedochází k častému zapínání osvětlovací soustavy. V takovém případě se plně projeví výhody tohoto zapojení, zejména lepší a stabilnější odběrové parametry. Snížená životnost trubic pak nebude hrát významnou roli.

Instalace, u kterých je vyžadováno časté rozsvěcování nebo ve kterých jsou použity drahé trubice, je výhodnější použít elektronické předřadníky. Ty jsou obecně lepší jak v odběrových parametrech, tak z pohledu životnosti trubic.

V průběhu řešení této práce byla vypracována metodika měření a zejména automatického vyhodnocování startovacího procesu zářivkového svítidla. Vytvořený program je univerzální a detekuje bezchybně všechny stavy zapalovacího děje u svítidel s paralelní i sériovou kompenzací účinníku.

Teoretická část práce shrnuje současné poznatky o životnosti komponent zářivkového svítidla. Zejména dobře je zpracována oblast optimalizace startu zářivky a mechanismy poškození kompenzačních kondenzátorů.

Logickým pokračováním této práce by bylo posuzování startů elektronických předřadníků, zejména předřadníků stmívatelných. Podmínky jejich provozu jsou již velmi dobře prozkoumány. Vhodné by bylo ověřit např. jejich robustnost k poruchám napájecí sítě, potlačení flikru nebo porovnat předřadníky různých výrobců.

7 Citovaná literatura

- [Ach90] ACHA, E. SEMLYEN, A. RAJKOCVIC, N. A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arc. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5. No. 3. July 1990. pg. 1390-1397, ISSN 0885-8977
- [Amp08] Poměr prodeje elektronických a elektromagnetických předřadníků. Elkovo-Čepelík, OSRAM. [ústní sdělení], Veletrh Amper 2008
- [App00] APPLICATION GUIDE TO 3 'TL', CFL, QL AND HALOGEN LAMPS LAMP CONTROL GEAR [online]. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2009-04-26]. Dostupné z WWW:
<http://www.lighting.philips.com/de_de/tools_downloads/downloads/technology/downloads/applgfluo.pdf>.
- [Bie02] BIERMAN, A, O'ROURKE, C. DENG, L. NARENDRAN, N. Testing a Lamp Life Predictor for Instant-Start Fluorescent Systems. IESNA 2002, Annual Conf. Lighting Updates. Pr. 141-156.
- [Bor95] BORGHETTI, A., et al Tests on Self-Healing Metallized Polypropylene Capacitors For Power Applications : pg. 556 - 561 . In Power Delivery, IEEE Transactions [online]. Bologna : Istituto di Elettrotecnica Ind., Bologna Univ. , 1995 [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=368354>. ISSN 0885-8977.
- [Bus09] BUSO, D. et al. Predictive Evaluation of Fluorescent Lamp Lifetime. Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. ISSN: 0197-2618
- [Car98] CARRILLO, Camilo. CIDRÁS, José. Harmonic model for the fluorescent lamp. IEEE. 1998. ISBN 0-7803-5105-3
- [Cav00] CAVALLINI, A., et al Models for Degradation of Self-healing Capacitors Operating under Voltage Distortion and Temperature : pg. 108 - 111 vol.1. In Properties and Applications of Dielectric 21.6. 2000 - 26.6. 2000 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=875641>. ISBN 0-7803-5459-1.

- [Cor08] CORAZZA, A.; GIORGI, S.; MASSARO, V. Mercury Dosing in Fluorescent Lamps. Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. pg.1-4. ISSN: 0197-2618
- [ČTK10]. PHILIPS: LED osvětlení překoná tržbami tradiční zdroje kolem 2015. O Světle, aktuálně o světle a osvětlení. [online] [cit. 7. 12. 2010], Dostupné na www: <<http://www.osvetle.cz/index.php/profesional/48-ostatniprofesional/54-philips-led-vize.html>>
- [Daš02] DAŠEK, Martin, et al. Osvětlování vnitřních prostorů: Praktické rady nejen pro elektrikáře [online]. Praha : SEVEN, 2002 [cit. 2009-10-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.efficientlighting.net/formerdoc/pubdoc/ELI68.pdf>>.
- [Div08] DIVIŠ, Milan. Startování zářivkových svítidel s paralelní a s DUO kompenzací účinníku. Liberec, 2008. 68 s. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [Dor02] DORLEIJN, J.W.F.; GOUD, L.H. Standardisation of the static resistances of fluorescent lamp cathodes and new data for preheating: pg. 665 - 672 vol.1. In Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh, PA, USA, 13.-18.10.2002 [online].[cit. 2010-09-27]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1044169>. ISBN 0-7803-7420-7.
- [Dra02] DRÁPELA, Jiří; PLCH, Jiří. Souhrnný pohled na zpětné rušivé vlivy OS na napájecí síť. Světlo : časopis pro světlenou techniku a osvětlování [online]. 2002, 2, [cit. 2009-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv020234.pdf>>.
- [Ele08] Elektronické učební pomůcky : Aplikovaná statistika s programem EXCEL - Náhodný jev a pravděpodobnost [online]. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav matematiky, c2008 [cit. 2010-06-02]. Náhodný jev, s. 11. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/mat/matstat/Apl_stat/_private/GRnahjev.pdf>.
- [Ele10] Scribd [online]. 2010-01-13 [cit. 2010-05-13]. 2. Elektrický proud v plynech a ve vakuu. Dostupné z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/25145163/2-Elektrick%C3%BD-Proud-v-Plynech-a-Ve>>.
- [Enn02] ENNIS, J.B., et al REPETITIVE PULSE APPLICATION OF SELF-

- HEALING HIGH VOLTAGE CAPACITORS : pg. 634 - 638 . In Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop [online]. 30.6.2002 - 03.7.2002 [cit. 2010-10-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1189558>. ISSN 1076-8467.
- [Eso10] ESO - Elektronické součástky CZ : Produkty [online]. c2010 [cit. 2010-03-18]. Fóliové kondenzátory - základní informace. Dostupné z WWW: <http://www.esostrava.cz/index.php?page=prod_15□=cz>.
- [EU05] EU-Compliant Magentic Ballasts, Situation with efferct from 21 November 2008. Vossloh-Schwabe. 2005. [online] [cit. 7. 12. 2010] Dostupné na www: <http://www.vossloh-sschwabe.com/images/onecms/site/publications/2000_55_EG_GB.pdf>
- [Gou02] GOUD, L.H. DORLEIJN, J.W.F. Standardized data for dimming of fluorescent lamps. IEEE 2002. pg. 673-679. ISBN 0-7803-7420-7
- [Ham97] HAMMER, E.E.; HAAS, D. PHOT'OCCELL ENHANCED TECHNIQUE FOR MEASURING STARTING ELECTRODE TEMPERATURES OF FLUORESCENT LAMPS : str. 2313 - 2333 vol.3 . In Industry Applications Conference ,5.10.1997 - 9.10.1997 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=626386>. ISBN 0-7803-4067-1.
- [Hig06] High Accuracy Ambient Light Sensor SFH 5711. Osram. 2006-08-03. [cit. 7. 7. 2008] Dostupné z www: <<http://www.datasheet4u.com/download.php?id=581207>>
- [Hsi98] HSIEH, Guan-Chyun; LIN, Chang-Hua; YU, Ben-Jong Igniting Behavior of the Fluorescent Lamp in High-Frequency Operation : pg. 964 - 969 vol.2 . In Industrial Electronics ,31.8.1998 - 4.9.1998 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=724224>.ISBN 0-7803-4503-7.
- [Cha06] CHALUPA, Ivan; VESELÝ, Jan; BLAHUTA, Jaroslav. Zkušenosti s kondenzátory v obvodech s výbojkami. Světlo : časopis pro světlenou techniku a osvětlování [online]. 2006, 01, [cit. 2010-01-02]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35921>.

[IEC60081] IEC60081. 2003

[JiY95] JI, Yunfen; DAVIS, Robert Starting Performance Of High-Frequency Electronic Ballasts For 4-Foot Fluorescent Lamps : pg. 2083 - 2089 vol.3 . In Industry Applications Conference, 8.10.1995 - 12.10.1995 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=530568>. ISBN 0-7803-3008-0.

[JiY99] JI, Yunfen. DAVIS, Robert. O'ROURKE, Conan. CHUI, Edmod Wai Mun. Compatitility Testing of Fluorescent Lamp and Ballast Systems. IEEE Trans. On Industry Appl. Vol. 35. No. 6. Nov. 1999. pg. 1271-1276. ISSN 0093-9994

[Kin64] KINSKÝ, Vlastimil. Zářivky. Praha: SNTL, 1964. 116 s.

[Kli03] KLIEN, D. A sensing and regulation concept for high end dimming ballasts. Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Vol. 2. pg. 785-790.

[Kob04] KOBEDA, Zdeněk. Průvodce skripty: Pravděpodobnost a statistika [online]. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická, Katedra matematiky, prosinec 2004 [cit. 2010-06-02]. Dostupné z WWW: <home.zcu.cz/~kobeda/psb/Pruvodce.pdf>.

[Kol07] KOLÁŘ, Václav; MLČÁK, Tomáš. Přednášky [online]. Ostrava: Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava, 2007 [cit. 2009-12-12]. Elektrické obvody střídavého proudu, s. 11. Dostupné z WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/3_stob_sylab_bc_07.pdf>.

[Koł99] KOŁAKOWSKI, Marek. POSVÍTÍME : Profesionální eshop s osvětlovací technikou [online]. c1999 [cit. 2009-10-14]. Napájecí systémy světelných zdrojů. Dostupné z WWW: <<http://www.posvitime.cz/napajeci-systemy-svetelných-zdroju>>.

- [Kom04] Kompenzační kondenzátory NN ZEZ SILKO. ELEKTROTECHNIKA V PRAXI [online]. 2004, 11,12, [cit. 2010-03-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/PDFs/zez111204.pdf>>.
- [Kom06a] DNA Central Europe s.r.o. [online]. 2006 [cit. 2010-03-18]. Kompenzační kondenzátory. Dostupné z WWW: <http://www.dna.cz/dna_ce.htm>.
- [Kom06b] ČESKÁ ENERGETIKA [online]. Smartware s.r.o., Redakční systém MultiCMS, 2006 [cit. 2009-12-01]. Kompenzace jalového výkonu. Dostupné z WWW: <http://www.ceskaenergetika.cz/kompenzace_jaloveho_vykonu_ucinik_dekompenzace/kompenzace_jaloveho_vykonu_2.html>
- [Kom07] Katalog EPCOS 2007: Kompenzace účinníku, řešení pro kvalitu elektrické energie [online]. Mnichov: EPCOS AG, 2007 [cit. 2010-01-02]. Dostupné z WWW: <http://www.el-insta.cz/data/epcos_katalog_2007.pdf>.
- [Kom10] Kompenzace jalové energie [online]. Žamberk: ZEZ SILKO, c2010 [cit. 2010-01-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/PDFs/pfcnew.pdf>>.
- [Kon03] TESLA [online]. 2003 [cit. 2010-01-08]. Kondenzátory kompenzační zářivkové. Dostupné z WWW: http://www.badura.cz/vyp_kon/katazari.htm
- [Kon07] KONG, ZhongHua, et al CALCULATION OF METALLIZED CAPACITOR'S INNER PRESSURE INTENSITY AND ITS INFLUENCE ON THE SELF-HEALING CHARACTERISTICS : pg. 609 - 609. In Plasma, 17.6.2007 - 22.6.2007 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4345915>. ISSN 0730-9244.
- [Kop07] KOPRNICKÝ, Jan. Electric Conductivity Model of Discharge Lapms. [Ph.D. Thesis], Tech. Univ. of Liberec, Univ. Paul Sabatier Toulouse III. 2007
- [Kot08] KOTKOVÁ, Jana. Výroba lineárních zářivek Philips v Roosendaalu. Světlo : časopis pro světlenou techniku a osvětlování [online]. 2008, 1, [cit. 2009-10-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36594.pdf>>.

- [LED10] Cree's New Lighting-Class LEDs Shatter Industry Performance Standards. Cree, Inc. 2010. [online], [cit. 7. 12. 2010]. Dostupné na www: <http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1289396994146>
- [Lin08] OSRAM [online]. 2008 [cit. 2009-10-15]. Lineární zářivky. Dostupné z WWW: <http://www.osram.cz/osram_cz/KATALOG/04_LINEARNI_ZARIVKY.pdf>.
- [Mad92] MADER, U. HORN, P. A Dynamic Model for the Electrical CHaracteristics of Fluorescent Lamps, IEEE. 1992. ISBN 0-7803-0634-1
- [Mad96] MADER, Urs. Steady*State Analysis of a Voltage-Fed Inventur with Sekond-Order Network and Fluorescent Lamp Load. IEEE, 1996. pg. 609-615. ISBN 7-7803-3044-7
- [Mah99] MAHAJAN K. S., KHARE P. K., CHANDRA B. P. The kinetic limitation of anti-Stokes luminescence of Er³⁺ and Yb³⁺ doped infrared upconversion materials. Journal of physics. Vol. 53, No. 5 November 1999. pp. 903–910
- [Mon99] MONTANARI, G.C.; FABIANI, D. Searching for the factors which affect self-healing capacitor degradation under non-sinusoidal voltage . In Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions [online]. [cit. 2010-01-26]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/94/16854/00775617.pdf?arnumber=775617>>.
- [Mrk09] MRKVIČKA, Tomáš. Pravděpodobnost a matematická statistika I [online]. České Budějovice : Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, 2009-03-16 [cit. 2010-06-02]. Dostupné z WWW: <<http://home.pf.jcu.cz/~mrkvicka/vyuka/PMS1Slides.pdf>>.
- [Nag92] NAGAMANI, H.N.; GANGA, S. A Study of Electrical Endurance of MPPF Capacitors and Selection of End-point Criteria : str. 1193 - 1201 . In Electrical Insulation, IEEE Transactions [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=204871>. ISSN 0018-9367.
- [Nov06] NOVÁK, Miroslav. Stavový model startování zářivkového tělesa II. - měření. K⁷ vědecko- populární časopis TU v Liberci. 2006, 1, s. 30-35. ISSN 1214-7370.

- [Nov08a] NOVÁK, Miroslav, VÁCLAVÍK, Jan. Vliv poruch napětí sítě na světelný tok výbojových zdrojů světla 1. Elektroinstalatér. 5/2008. s. 44-46. ISSN 1211-2291
- [Nov08b] NOVÁK, Miroslav, VÁCLAVÍK, Jan. Vliv poruch napětí sítě na světelný tok výbojových zdrojů světla 2. Elektroinstalatér. 6/2008. s. 47-49. ISSN 1211-2291
- [Nov99] NOVOVIČOVÁ, Jana. Pravděpodobnost a matematická statistika [online]. Praha : ČVUT Praha, 1999 [cit. 2010-06-02]. Dostupné z WWW: <<http://euler.fd.cvut.cz/publikace/files/skripta3.pdf>>.
- [Par09] ELECTRONICON: always in charge [online]. 1998 -2009 [cit. 2010-01-02]. Parallelkondensatoren für Gasentladungslampen. Dostupné z WWW: <<http://www.electronicon.com/produkte/kondensatoren-fuer-leuchten-motoren-allg-ac-anwendungen/parallel-und-reihen-kondensatoren-fuer-gasentladungslampen/>>.
- [Rek73] REKTORYS, Karel, et al. Přehled užití matematiky. 3. Praha : SNTL, 1973. 1040 s.
- [Res03] Reducing Barriers to Use of High efficiency Lighting Systems. Final Report, Year 2. Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute. New York, 2003.
- [Ric03] RICHTER, Aleš, NOVÁK, Miroslav. Science and technology of power systems for light sources State of the art, Future Challenges. [pevný disk] Tutorial conf. ECMS, 2003
- [Rou02] ROUWELER, Gepard. WEL, Hans. Environmental Assessment of Lamps. [pevný disk] Meeting of COST project, Toulouse 2002.
- [Řez00] ŘEZANKOVÁ, Hana; MAREK, Luboš; VRABEC, Michal. IASTAT - interaktivní učebnice statistiky : Pojem pravděpodobnosti, náhodný jev [online]. ČR : Fond rozvoje vysokých škol MŠMT ČR, 09/2000, 2001 [cit. 2010-06-02]. Dostupné z WWW: <<http://iastat.vse.cz/nahjev.htm>>, <http://iastat.vse.cz/prst.htm>
- [Sha06] SHAFI, M.A.; MCMAHON, R.A. Influence of Voltage and Frequency Dimming on Power Losses in HF Electronic Ballasts for Compact Fluorescent Lamps. Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Vol. 5. pg. 2193-2197

- [Sta99] ElektroPalouček [online]. c1999 [cit. 2009-10-10]. Startéry - zapalovače. Dostupné z WWW: <http://www.elektro-paloucek.cz/prislusenstvi-pro-svitidla-zarivkove-startery-elektro-316_1208_1209.html?cPath=316_1208_1209>.
- [Sve08] Světelné zdroje. In Elektrické obvody - materiály (FA) : Presentace a výukové texty (přednášky) [online]. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Ústav mechatroniky a technické informatiky, c2008 [cit. 2010-03-18]. Dostupné z WWW: <www.mti.tul.cz/files/eloA/09-pr_EST_zdroje_1-10.pdf>.
- [Šol04] ŠOLCOVÁ, Veronika. Zářivky. K⁷ vědecko- populární časopis TU v Liberci. 2004, 4, s. 5-8. ISSN 1214-7370.
- [Šol05a] ŠOLCOVÁ, Veronika. Stavový model startování zářivkového svítidla. K⁷ vědecko- populární časopis TU v Liberci. 2005, 4, s. 30-35. ISSN 1214-7370.
- [Tam03] TAM, P.W. et al. Practical evaluation of dimming control methods for electronic ballasts. Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Vol. 2. pg. 799-804.
- [Tet01] TETRI, Eino. Effect of dimming and cathode heating on lamp life of fluorescent lamps. [Ph.D. Thesis] Helsinki University of Technology
- [Tet97] TETRI, Eino. Profitability of Switching off Fluorescent Lamps: Take-a-break. Right Light 4. 1997. Vol. 1.
- [Tko02] TKOTZ, Klaus. ElektriKa: elektrotechnika každý den [online]. 2002 [cit. 2009-10-10]. Startér. Dostupné z WWW: <<http://elektriKa.cz/terminolog/starter-zapalovac>>.
- [Tla10] TLAIS, Z. et al. Auxiliary heating influence on barium loss from fluorescent lamp electrode under HF operation. Plasma Science, 2010 IEEE International Conf.

- [Wak06] WAKABAYASHI, F.T., et al Setting the Preheating Process of Electronic Ballasts for Hot-Cathode Fluorescent Lamps, considering the Rh /Rc Ratio: pg. 2396 - 2401 . In IEEE Industrial Electronics, IECON 06.-10.11.2006 [online]. [cit. 2010-09-27]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4153116>. ISBN 1-4244-0390-1.
- [Wak07a] WAKABAYASHI, F.T., et al Setting the Preheating and Steady-State Operation of Electronic Ballasts, Considering Electrodes of Hot-Cathode Fluorescent Lamps: pg. 899 - 911 . In Power Electronics, IEEE Transactions [online]. [cit. 2010-09-27]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4182484>. ISSN 0885-8993.
- [Wak07b] WAKABAYASHI, F.T., et al Model for Electrodes' Filaments of Hot Cathode Fluorescent Lamps, During Preheating With Constant rms Current: pg. 719 - 726 . In Power Electronics, IEEE Transactions [online] [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4182483>. ISSN 0885-8993.
- [Wha02] WHARMBY, David. Science and technology of light sources, State of the art, Future Challenges. [pevný disk] Meeting of COST project, Toulouse 2002.
- [Xin00] XIN, Dai, et al Influence Factors for the Self-healing of Metallized Polypropylene Capacitors : str. 461 - 465 vol.2 . In Electrical Insulation and Dielectric, 15.10. 2000 - 18.10. 2000 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=883998>. ISBN 0-7803-6413-9.
- [Zis03] ZISSIS, Georges. BUSO, David. Using full Physical Model for Fluorescent Lamps in Ballast Engineering. IEEE Industry Appl. Conference, 2003. Pg. 537-541. ISBN 0-7803-7883-0
- ISSN 1070-9878.

8 Přílohy

8.1 Parametry náhradního obvodu svítidla s elektromagnetickým předřadníkem

Tabulka 8.1: Parametry kondenzátoru s paralelní kompenzací

Číslo měření	Pozice zářivky	Naměřené hodnoty:				Vypočtené hodnoty:	
		U _C [V]	I _C [A]	P _C [W]	Q _C [Var]	X _C [Ω]	C [μF]
1.	12.	229,4	0,3376	0,13	77,32	678,40	4,69
2.	11.	229,4	0,3345	0,11	76,75	685,94	4,64
3.	10.	229,5	0,3273	0,12	75,04	700,49	4,54
4.	9.	229,4	0,3087	0,13	70,68	741,69	4,29
5.	8.	229,5	0,3099	0,15	70,91	738,35	4,31
6.	7.	229,5	0,3084	0,14	70,68	743,14	4,28
7.	6.	229,4	0,3099	0,16	70,91	738,35	4,31
8.	5.	229,5	0,3124	0,13	71,60	733,65	4,34
9.	4.	229,6	0,3122	0,12	71,39	732,44	4,35
10.	3.	229,5	0,3091	0,13	70,70	739,98	4,30
11.	2.	229,5	0,3101	0,17	71,17	740,11	4,30
12.	1.	229,4	0,3102	0,14	71,15	739,42	4,30
Ø		229,47 ± 0,02	0,316 ± 0,004	0,316 ± 0,006	72,4 ± 0,8	726 ± 7	4,39 ± 0,05

Tabulka 8.2: Parametry kondenzátoru se sériovou kompenzací

Pozice zářivky	Naměřené hodnoty:				Vypočtené hodnoty:	
	U _C [V]	I _C [A]	P _C [W]	Q _C [Var]	X _C [Ω]	C [μF]
12.	229,1	0,2486	0,14	56,82	919,39	3,46
11.	229,2	0,2506	0,12	57,32	912,73	3,49
10.	229,2	0,2517	0,13	57,54	908,25	3,50
9.	229,2	0,2473	0,12	56,64	926,14	3,44
8.	229,3	0,2521	0,10	57,79	909,30	3,50
7.	229,3	0,2526	0,11	57,79	905,70	3,51
6.	229,2	0,2490	0,12	57,10	920,95	3,46
5.	229,3	0,2482	0,13	56,88	923,33	3,45
4.	229,3	0,2496	0,12	57,90	929,37	3,43
3.	229,3	0,2522	0,13	57,80	908,74	3,50
2.	229,3	0,2524	0,12	57,78	906,98	3,51
1.	229,3	0,2510	0,11	57,57	913,80	3,48
Ø	229,25 ± 0,02	0,2504 ± 0,0006	0,121 ± 0,004	57,4 ± 0,2	915 ± 3	3,478 ± 0,009

Tabulka 8.3: Parametry tlumivky, vláken, startéru a trubice ve stavu „ohřev startéru“ - paralelní kompenzace účinníku

Číslo měření	Pozice zářivky	Tlumivka			2 vlákna		Startér
		U_L [V]	I_L [mA]	P_L [mW]	Q_L [Var]	P_{V1} [mW]	U_{St} [V]
1.	12.	9,27	12,9	13,1	0,119	2,5	228,85
2.	12.	9,92	13,5	8,2	0,134	5,7	228,75
3.	12.	10,15	13,6	8,2	0,138	5,8	228,73
4.	12.	9,90	13,1	13,5	0,129	0,9	228,76
5.	12.	9,74	13,2	12,8	0,128	3,2	228,78
6.	12.	9,72	13,5	11,5	0,131	4,0	228,79
7.	12.	9,91	13,6	11,2	0,135	4,2	228,78
8.	12.	9,94	14,0	8,2	0,138	6,3	228,71
9.	12.	10,11	13,5	14,9	0,136	0,3	228,75
10.	12.	9,99	13,4	10,7	0,133	4,2	228,71
Ø 12.		9,87 ± 0,08	13,4 ± 0,1	11,2 ± 0,8	0,132 ± 0,002	3,7 ± 0,7	228,76 ± 0,02
1.	11.	9,45	13,5	20,8	0,126	1,3	228,79
2.	11.	10,39	13,8	19,7	0,142	2,1	228,72
3.	11.	10,37	14,4	19,1	0,149	1,8	228,72
4.	11.	10,54	14,0	19,9	0,146	1,7	228,72
5.	11.	10,79	14,6	21,6	0,156	2,2	228,70
6.	11.	10,73	14,5	21,4	0,154	1,3	228,71
7.	11.	10,86	13,9	22,5	0,149	1,3	228,70
8.	11.	10,87	14,8	20,0	0,159	1,6	228,67
9.	11.	10,35	13,8	21,1	0,141	1,4	228,72
10.	11.	10,57	14,8	20,6	0,155	2,9	228,68
Ø 11.		10,5 ± 0,2	14,2 ± 0,2	20,7 ± 0,4	0,148 ± 0,004	1,8 ± 0,2	228,71 ± 0,02
Ø 12. a 11.		10,2 ± 0,2	13,8 ± 0,2	16 ± 2	0,140 ± 0,003	2,7 ± 0,4	228,74 ± 0,01

Číslo měření	Pozice zářivky	Tlumivka			2 vlákna	Startér
		X_L [Ω]	L_L [H]	R_L [Ω]	R_{V1} [Ω]	R_{St} [kΩ]
1.	12.	715,59	2,28	79,01	15,00	17,78
2.	12.	732,07	2,33	44,94	31,22	16,91
3.	12.	744,67	2,37	44,03	31,26	16,81
4.	12.	752,25	2,39	78,64	5,02	17,48
5.	12.	732,96	2,33	72,92	18,03	17,30
6.	12.	715,30	2,28	62,70	21,66	16,90
7.	12.	724,41	2,31	60,27	22,51	16,78
8.	12.	710,84	2,26	41,89	32,14	16,39
9.	12.	742,01	2,36	81,35	1,89	16,88
10.	12.	745,55	2,37	59,94	23,63	17,13
Ø 12.		732 ± 5	2,33 ± 0,02	63 ± 5	20 ± 4	17,0 ± 0,2
1.	11.	688,59	2,19	113,11	7,30	16,89
2.	11.	744,02	2,37	102,67	11,09	16,53
3.	11.	711,68	2,27	91,59	8,66	15,83
4.	11.	746,72	2,38	101,94	8,75	16,35
5.	11.	731,05	2,33	101,10	10,13	15,64
6.	11.	734,60	2,34	102,38	6,19	15,81
7.	11.	774,08	2,46	117,06	6,78	16,49
8.	11.	730,23	2,32	91,79	7,48	15,48
9.	11.	741,02	2,36	110,65	7,26	16,56
10.	11.	709,60	2,26	94,63	13,49	15,49
Ø 11.		731 ± 8	2,33 ± 0,03	103 ± 3	8,7 ± 0,8	16,1 ± 0,2
Ø 12. a 11.		731 ± 5	2,33 ± 0,02	83 ± 6	14 ± 3	16,6 ± 0,2

Tabulka 8.4: Parametry tlumivky, vláken a trubice ve stavu „žhavení“ - paralelní kompenzace účinku

Číslo měření	Pozice zářivky	Tlumivka				2 vlákna
		UL [V]	IL [A]	PL [W]	QL [Var]	PVI [W]
1.	12.	228,58	0,590	15,36	134,09	5,16
2.	12.	228,54	0,591	15,41	134,13	5,11
3.	12.	228,28	0,590	15,31	133,74	6,40
4.	12.	228,50	0,591	15,41	134,05	5,21
5.	12.	228,32	0,589	15,49	133,66	6,16
6.	12.	228,40	0,590	15,52	133,77	5,69
7.	12.	228,39	0,589	15,52	133,70	5,75
8.	12.	228,52	0,590	15,42	133,92	5,41
9.	12.	228,73	0,592	15,59	134,42	4,48
10.	12.	228,77	0,591	15,49	134,48	4,38
Ø 12.		228,50 ± 0,06	0,5903 ± 0,0004	15,45 ± 0,03	134,0 ± 0,1	5,4 ± 0,3
1.	11.	228,69	0,587	18,61	133,02	4,90
2.	11.	228,59	0,587	18,61	132,96	5,10
3.	11.	228,51	0,586	18,60	132,71	5,70
4.	11.	228,35	0,587	18,60	132,76	5,92
5.	11.	228,57	0,587	18,74	132,93	5,38
6.	11.	228,15	0,586	18,65	132,29	6,67
7.	11.	228,74	0,589	18,78	133,37	4,60
8.	11.	228,84	0,589	18,76	133,47	4,30
9.	11.	228,44	0,587	18,74	132,73	5,65
10.	11.	228,84	0,590	18,78	133,63	4,35
Ø 11.		228,57 ± 0,07	0,5875 ± 0,0005	18,69 ± 0,03	133,0 ± 0,2	5,3 ± 0,3
Ø 12. a 11.		228,54 ± 0,05	0,5889 ± 0,0005	17,1 ± 0,4	133,6 ± 0,3	5,3 ± 0,2

Číslo měření	Pozice zářivky	Tlumivka			2 vlákna
		X _L [Ω]	L _L [H]	R _L [Ω]	R _{VL} [Ω]
1.	12.	384,61	1,22	44,05	14,80
2.	12.	384,33	1,22	44,16	14,63
3.	12.	384,60	1,22	44,03	18,39
4.	12.	384,42	1,22	44,19	14,93
5.	12.	384,85	1,23	44,60	17,75
6.	12.	384,80	1,22	44,64	16,35
7.	12.	384,94	1,23	44,68	16,54
8.	12.	384,82	1,22	44,30	15,56
9.	12.	384,05	1,22	44,55	12,80
10.	12.	384,35	1,22	44,30	12,52
Ø 12.		384,6 ± 0,1	1,222 ± 0,002	44,35 ± 0,08	15,4 ± 0,7
1.	11.	385,60	1,23	53,93	14,21
2.	11.	385,44	1,23	53,95	14,80
3.	11.	385,87	1,23	54,07	16,56
4.	11.	385,23	1,23	53,96	17,18
5.	11.	385,37	1,23	54,32	15,60
6.	11.	385,82	1,23	54,40	19,45
7.	11.	384,66	1,22	54,18	13,27
8.	11.	384,77	1,22	54,09	12,41
9.	11.	385,48	1,23	54,42	16,42
10.	11.	384,30	1,22	54,01	12,50
Ø 11.		385,3 ± 0,2	1,227 ± 0,002	54,13 ± 0,06	15,2 ± 0,8
Ø 12. a 11.		384,9 ± 0,2	1,225 ± 0,002	49 ± 2	15,3 ± 0,5

Tabulka 8.5: Parametry tlumivky a trubice ve stavu „svícení“ - paralelní kompenzace účinníku

Číslo měření	Pozice zářivky	Tlumivka:				Zářivka:		
		U _L [V]	I _L [mA]	P _L [W]	Q _L [Var]	U _Z [V]	P _Z [W]	Q _Z [Var]
1.	12.	199,64	474	10,26	94,08	77,56	28,31	23,46
2.	12.	197,68	467	10,01	91,72	81,87	29,28	24,56
3.	12.	199,39	472	10,20	93,51	78,27	28,32	23,70
4.	12.	199,17	472	10,16	93,43	78,66	28,55	23,72
5.	12.	199,30	472	10,28	93,43	78,39	28,24	23,86
6.	12.	199,13	472	10,24	93,33	78,53	28,42	23,73
7.	12.	199,11	472	10,26	93,34	78,54	28,41	23,77
8.	12.	198,60	470	10,16	92,72	79,71	28,61	24,15
9.	12.	199,13	472	10,34	93,45	78,29	28,26	23,83
10.	12.	198,99	470	10,13	93,06	79,02	28,50	23,87
Ø 12.		199,0 ± 0,2	471,3 ± 0,6	10,20 ± 0,03	93,2 ± 0,2	78,9 ± 0,4	28,5 ± 0,1	23,9 ± 0,1
1.	11.	199,46	469	12,51	92,78	77,90	28,19	23,28
2.	11.	196,24	458	11,92	89,04	85,23	29,76	25,23
3.	11.	198,80	467	12,48	91,98	79,75	28,62	23,81
4.	11.	199,37	468	12,43	92,51	78,62	28,08	23,80
5.	11.	198,63	466	12,45	91,81	80,11	28,66	23,97
6.	11.	199,11	468	12,49	92,29	79,01	28,25	23,82
7.	11.	198,34	465	12,40	91,47	80,59	28,73	24,11
8.	11.	198,59	466	12,34	91,69	80,32	28,78	23,92
9.	11.	198,36	465	12,39	91,41	80,66	28,80	24,03
10.	11.	198,30	465	12,40	91,42	80,67	28,88	23,97
Ø 11.		198,5 ± 0,3	466 ± 1	12,38 ± 0,06	91,6 ± 0,4	80,3 ± 0,7	28,7 ± 0,2	24,0 ± 0,2
Ø 12. a 11.		198,8 ± 0,2	468,5 ± 0,9	11,3 ± 0,3	92,4 ± 0,3	79,6 ± 0,4	28,58 ± 0,09	23,93 ± 0,09

Číslo měření	Pozice zářivky	Tlumivka:			Zářivka:		
		X _L [Ω]	L _L [H]	R _L [Ω]	X _Z [Ω]	L _Z [H]	R _Z [Ω]
1.	12.	418,65	1,33	45,64	104,39	0,33	125,98
2.	12.	421,01	1,34	45,95	112,74	0,36	134,37
3.	12.	420,16	1,34	45,82	106,47	0,34	127,24
4.	12.	419,61	1,34	45,61	106,52	0,34	128,22
5.	12.	420,05	1,34	46,22	107,28	0,34	126,96
6.	12.	419,78	1,34	46,07	106,75	0,34	127,84
7.	12.	419,70	1,34	46,14	106,89	0,34	127,73
8.	12.	420,33	1,34	46,06	109,48	0,35	129,69
9.	12.	419,16	1,33	46,37	106,87	0,34	126,77
10.	12.	420,51	1,34	45,79	107,85	0,34	128,78
Ø 12.		419,9 ± 0,3	1,338 ± 0,002	45,97 ± 0,08	107,5 ± 0,8	0,342 ± 0,003	128,4 ± 0,8
1.	11.	421,13	1,34	56,80	105,68	0,34	127,97
2.	11.	424,88	1,35	56,89	120,40	0,38	142,02
3.	11.	421,94	1,34	57,24	109,24	0,35	131,31
4.	11.	422,06	1,34	56,70	108,58	0,35	128,11
5.	11.	421,95	1,34	57,21	110,18	0,35	131,72
6.	11.	421,87	1,34	57,10	108,90	0,35	129,14
7.	11.	422,29	1,34	57,24	111,32	0,35	132,64
8.	11.	422,47	1,34	56,85	110,21	0,35	132,60
9.	11.	422,67	1,35	57,27	111,12	0,35	133,18
10.	11.	422,37	1,34	57,29	110,77	0,35	133,42
Ø 11.		422,4 ± 0,4	1,342 ± 0,002	57,06 ± 0,08	111 ± 2	0,352 ± 0,004	132 ± 2
Ø 12. a 11.		421,1 ± 0,4	1,340 ± 0,002	52 ± 2	109,1 ± 0,8	0,347 ± 0,003	130,3 ± 0,9

Výchozími hodnotami pro výpočet parametrů tlumivky, vláken, startéru a trubice, byly naměřené hodnoty napětí na tělese $U_{\text{TĚLESO}}$, napětí na zářivce U_{LAMP} , napětí na startéru $U_{\text{STARTÉR}}$ a proudy $I_{\text{TĚLESO}}$, I_{LAMP} . Parametry jsou vypočteny pro náhradní obvody třech stavů zapalování výboje: ohřev startéru, žhavení, svícení. Hodnoty vláken jsou počítány pro 2 vlákna. Náhradní obvody stavů jsou znázorněny v následující příloze 9.2. Měření bylo opakovaně prováděno 10× a s napájením 230 V pro dvě zářivky na pozicích 11 a 12.

Vztahy pro výpočet parametrů ve stavech „ohřev startéru“ a „žhavení“

$$\text{Činný výkon tlumivky:} \quad P_L = \frac{1}{T} \int_0^T (u_L \cdot i_L) \cdot dt \quad (8.1)$$

$$\text{Zdánlivý výkon tlumivky:} \quad S_L = U_{L\text{ef}} \cdot I_{L\text{ef}} \quad (8.2)$$

$$\text{Jalový výkon tlumivky:} \quad Q_L = \sqrt{(S_L^2 - P_L^2)} \quad (8.3)$$

$$\text{Napětí na tlumivce:} \quad U_L = U_{\text{Teleso}} - U_{\text{Lamp}} \quad (8.4)$$

$$\text{Proud tlumivky, vláken, startéru:} \quad I_L = I_{\text{vl}} = I_{\text{St}} = I_{\text{Teleso}} \quad (8.5)$$

$$\text{Reaktance tlumivky:} \quad X_L = \frac{Q_L}{I_L^2} \quad (8.6)$$

$$\text{Indukčnost tlumivky:} \quad L_L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (8.7)$$

$$\text{Odpor tlumivky:} \quad R_L = \frac{P_L}{I_L^2} \quad (8.8)$$

$$\text{Činný výkon vlákna:} \quad \text{viz vzorec 9.1}$$

$$\text{Odpor vlákna:} \quad \text{viz vzorec 9.8}$$

$$\text{Odpor startéru:} \quad R_{\text{St}} = \frac{U_{\text{St}}}{I_{\text{St}}} \quad (8.9)$$

Vztahy pro výpočet parametrů ve stavu „svícení“

Parametry **tlumivky** byly vypočteny podle vzorců pro stav „ohřev startéru“.

$$\text{Činný výkon zářivky:} \quad P_Z = \frac{1}{T} \int_0^T (u_Z \cdot i_Z) \cdot dt \quad (8.10)$$

$$\text{Zdánlivý výkon zářivky:} \quad S_Z = U_{Z\text{ef}} \cdot I_{Z\text{ef}} \quad (8.11)$$

$$\text{Jalový výkon zářivky:} \quad Q_Z = \sqrt{(S_Z^2 - P_{ZL}^2)} \quad (8.12)$$

$$\text{Reaktance zářivky:} \quad X_Z = \frac{Q_Z}{I_Z^2} \quad (8.13)$$

$$\text{Indukčnost zářivky:} \quad L_Z = \frac{X_Z}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (8.14)$$

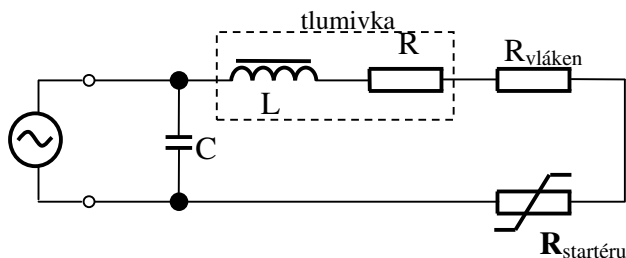
$$\text{Odpor zářivky:} \quad R_Z = \frac{P_{ZL}}{I_Z^2} \quad (8.15)$$

Protože je u sériové (DUO) kompenzace účinníku počítáno se stejnými prvky jako u paralelní kompenzace, jsou uvedené parametry pro DUO kompenzaci totožné.

8.2 Náhradní obvody pro svítidlo s paralelní kompenzací

8.2.1 Ohřev startéru

Po připojení síťového napětí dojde mezi elektrodami startéru k doutnavému výboji. V obvodu se proto uplatní nejen náhradní obvod tlumivky, kompenzační kondenzátor a odpor vláken, ale i odpor doutnavého výboje startéru.



Obrázek 8.1: Náhradní obvod svítidla s paralelní kompenzací pro stav „Ohřev startéru“

Impedance pro sériovou větev obvodu se určí jako součet impedancí jednotlivých prvků v dané větvi

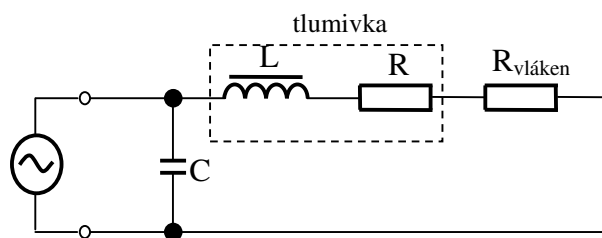
$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} \quad (8.16)$$

Celková impedance svítidla je potom

$$Z_{celk} = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{U}{I}. \quad (8.17)$$

8.2.2 Žhavení

Vlivem doutnavého výboje se bimetalová elektroda zahřeje a prohne, čímž dojde ke spojení elektrod. Odpor startéru klesne prakticky na nulu. Startérem prochází proud přes vlákna zářivky a dochází k jejich žhavení a termoemisi. Proud je při žhavení omezen tlumivkou a odporem vláken zářivky. Induktivní odběr proudu je tak silný, že jej kompenzační kondenzátor vykompenzuje jen částečně.



Obrázek 8.2: Náhradní obvod svítidla s paralelní kompenzací pro stav „Žhavení zářivky“

Impedance sériové větve tohoto obvodu se vypočte jako

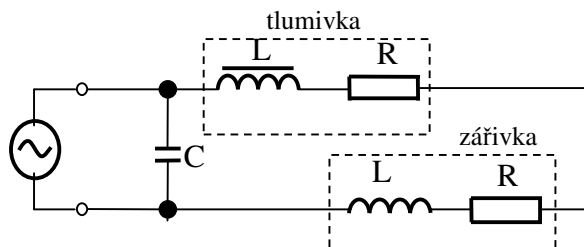
$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} \quad (8.18)$$

a celková impedance při žhavení je dána

$$Z_{\text{celk}} = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{U}{I}. \quad (8.19)$$

8.2.3 Svícení

Po přerušení proudového obvodu při žhavení se na tlumivce naindukuje napětí, které se sečte se síťovým. Výsledný součet obou napětí zapálí výboj na elektrodách zářivky.



Obrázek 8.3: Náhradní obvod svítidla s paralelní kompenzací pro stav „Svícení“

Při svícení se v obvodu uplatní náhradní obvody tlumivky a zářivky. Vzhledem k

tomu, že výboj zářivky má značný induktivní charakter, uplatní se v náhradním obvodu zářivky jeho indukčnost. Impedance sériové větve obvodu při svícení se vypočte jako

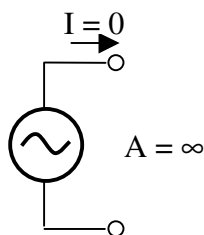
$$Z_1 = Z_{Ltl} + Z_{Rtl} + Z_{Lzř} + Z_{Rzřz} \quad (8.20)$$

Celková impedance obvodu při svícení je potom

$$Z_{\text{celk}} = \frac{Z_1 \cdot Z_C}{Z_1 + Z_C} = \frac{U}{I}. \quad (8.21)$$

8.2.4 Vypnutí

Při vypnutí je zářivkové těleso odpojeno vypínačem a jeho impedance je tedy nekonečně velká.



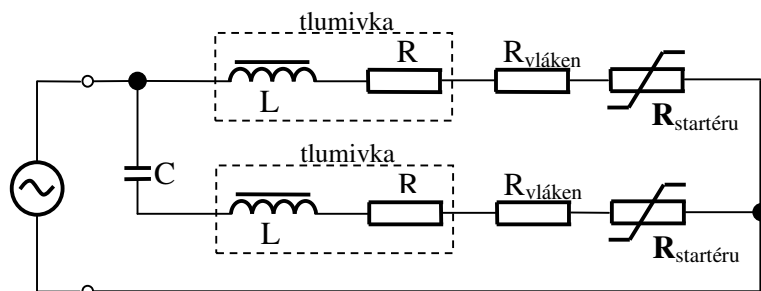
Obrázek 8.4: Náhradní obvod pro stav „Vypnutí“

8.2.5 Odskok kontaktů

Náhradní obvod pro odskok kontaktů odpovídá obvodu pro ohřev. Doba trvání odskoku kontaktů je minimální, a proto dochází k potížím při zjišťování tohoto stavu z měření dle parametrů A a φ . Obvodové veličiny při odskoku kontaktů startéru při procesu žhavení jsou znázorněny na obr. 4.8, str. 81.

8.3 Náhradní obvody pro svítidlo se sériovou (DUO) kompenzací

8.3.1 Ohřev startéru



Obrázek 8.5: Náhradní obvod svítidla se sériovou kompenzací pro stav „Ohřev startéru“

Impedance nekompenzované větve se určí jako součet impedancí jednotlivých prvků v dané větvi

$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} \quad (8.22)$$

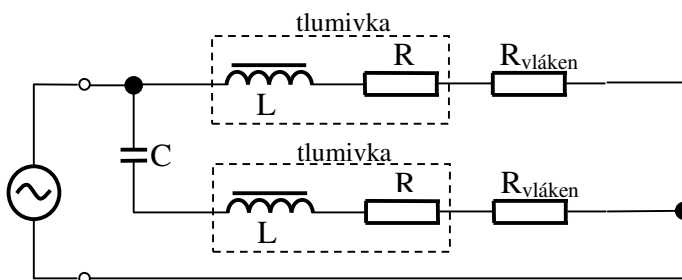
Podobně se určí komplexní impedance větve kompenzované

$$Z_2 = Z_C + Z_L + Z_R + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} \quad (8.23)$$

Celková impedance obvodu při ohřevu startéru je pak dána součtem převrácených hodnot impedancí samostatných větví

$$Z_{celk} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{U}{I} \quad (8.24)$$

8.3.2 Žhavení



Obrázek 8.6: Náhradní obvod svítidla se sériovou kompenzací pro stav „Žhavení zářivky“

Impedance nekompensované větve je dána

$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} \quad (8.25)$$

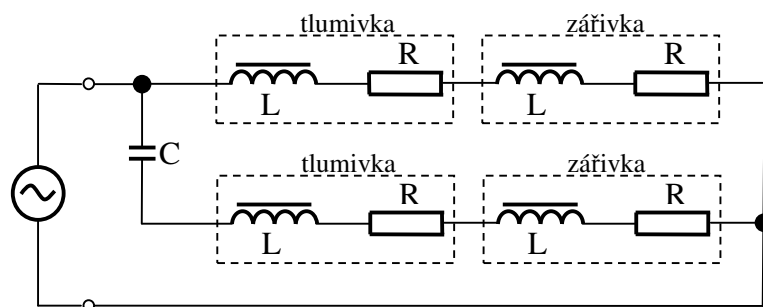
Podobně se určí komplexní impedance větve kompenzované

$$Z_2 = Z_C + Z_L + Z_R + Z_{Rvl} \quad (8.26)$$

Celková impedance obvodu při stavu žhavení je pak dána

$$Z_{\text{celk}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{U}{I} \quad (8.27)$$

8.3.3 Svícení



Obrázek 8.7: Náhradní obvod svítidla se sériovou kompenzací pro stav „Svícení“

Impedance nekompensované větve je dána

$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Lzáf} + Z_{Rzáf} \quad (8.28)$$

Podobně se určí komplexní impedance větve kompenzované

$$Z_2 = Z_C + Z_L + Z_R + Z_{Lzáf} + Z_{Rzáf} \quad (8.29)$$

Celková impedance obvodu při svícení je pak dána

$$Z_{\text{celk}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{U}{I} \quad (8.30)$$

Při poruše jedné z trubic DUO obvodu zůstane příslušná část obvodu nefunkční a obvod se bude chovat jako samostatná větev. Celková impedance pak bude rovna impedanci samostatné větve s funkční trubicí.

8.4 Četnosti přechodů mezi jednotlivými stavy

Tabulky obsahují průměrné četnosti přechodů mezi jednotlivými stavy během jednoho startu.

Označení stavů je přitom uvedeno v následující tabulce:

Tabulka 8.6: Označení stavů

Stav	popis
S0	Není napájení
S1	Ohřev bimetalového startéru
S2	Žhavení elektrod zářivky, startér septnut
S3	Odskok kontaktů startéru
S4	Svícení zářivky
S5	Nárůst napájení na kondenzátoru před zapálením zářivky u sériové kompenzace účinníku

Tabulka 8.7: Četnosti přechodů mezi stavy, průměr 1. zářivky (11. zářivka, 50×5 měření)

		Četnost přechodů během jednoho startu								
		S0>S1	S1>S2	S2>S3 S3>S2	S2>S4	S4>S1	S2>S1	S1>S4	S4>S2	S2>S5 S5>S4
Zapojení:	Napětí [V]:	P1	P2	P3	P4	P6	P7	P8	P9	P14
CpL1	207	1,00	4,70	6,86	4,50	5,66	0,34	2,30	0,14	0,00
	218,5	1,00	4,06	5,74	3,96	3,26	0,38	0,58	0,30	0,00
	230	1,00	2,94	4,10	3,20	2,60	0,16	0,82	0,42	0,00
	241,5	1,00	2,34	3,00	2,50	1,56	0,08	0,30	0,26	0,00
	253	1,00	1,76	3,24	2,02	0,84	0,04	0,12	0,30	0,00
CpL2	207	1,00	5,30	10,10	5,22	5,26	0,52	1,48	0,44	0,00
	218,5	1,00	3,92	7,26	3,88	3,00	0,36	0,42	0,32	0,00
	230	1,00	2,72	5,24	2,94	2,16	0,16	0,60	0,38	0,00
	241,5	1,00	2,04	4,40	2,32	1,04	0,18	0,18	0,48	0,00
	253	1,00	1,80	3,40	2,16	0,88	0,02	0,10	0,38	0,00
CsL1	207	1,00	5,96	11,40	6,54	5,74	0,28	1,04	1,88	0,80
	218,5	1,00	4,06	8,72	5,32	3,34	0,26	0,54	2,18	0,66
	230	1,00	3,48	7,76	4,92	2,92	0,20	0,64	1,98	0,34
	241,5	1,00	2,64	6,28	4,26	1,86	0,16	0,38	2,28	0,50
	253	1,00	2,38	5,62	4,08	2,02	0,10	0,74	2,28	0,46
CsL2	207	1,00	5,24	12,20	6,26	4,54	0,18	0,48	1,92	0,68
	218,5	1,00	4,00	9,82	5,06	3,66	0,14	0,80	1,86	0,66
	230	1,00	3,14	8,04	4,32	2,60	0,12	0,58	1,82	0,52
	241,5	1,00	2,62	6,90	3,98	1,892	0,14	0,44	1,86	0,34
	253	1,00	2,24	5,46	3,70	1,60	0,12	0,48	2,00	0,38
L1	207	1,00	4,18	8,44	4,14	3,78	0,30	0,90	0,26	0,00
	218,5	1,00	3,24	6,30	3,26	2,68	0,26	0,70	0,28	0,00
	230	1,00	2,78	5,00	2,96	1,90	0,20	0,32	0,38	0,00
	241,5	1,00	2,24	3,78	2,30	1,52	0,12	0,40	0,18	0,00
	253	1,00	1,68	3,38	1,92	0,78	0,06	0,16	0,30	0,00

Tabulka 8.8: Četnosti přechodů mezi stavy, průměr jedné zářivky (12. zářivka, 50×5 měření)

		Četnost přechodů během jednoho startu								
		S0>S1	S1>S2	S2>S3 S3>S2	S2>S4	S4>S1	S2>S1	S1>S4	S4>S2	S2>S5 S5>S4
Zapojení:	Napětí [V]:	P1	P2	P3	P4	P6	P7	P8	P9	P14
CpL1	207	1,00	3,88	3,90	4,04	4,46	0,12	1,70	0,28	0,00
	218,5	1,00	2,64	3,38	2,76	1,90	0,14	0,40	0,28	0,00
	230	1,00	2,20	2,70	2,48	1,62	0,04	0,46	0,32	0,00
	241,5	1,00	2,06	2,22	2,44	1,14	0,06	0,14	0,44	0,00
	253	1,00	1,42	2,22	1,76	0,46	0,04	0,08	0,38	0,00
CpL2	207	1,00	4,36	5,60	4,26	5,44	0,26	2,34	0,16	0,00
	218,5	1,00	2,98	3,80	3,04	2,60	0,18	0,80	0,24	0,00
	230	1,00	2,70	3,68	2,94	2,30	0,04	0,64	0,28	0,00
	241,5	1,00	2,06	3,04	2,28	1,34	0,08	0,36	0,30	0,00
	253	1,00	1,62	2,26	1,84	0,62	0,00	0,00	0,22	0,00
CsL1	207	1,00	4,76	6,90	6,32	4,56	0,30	1,10	2,46	0,60
	218,5	1,00	3,64	6,34	5,10	3,32	0,22	0,90	2,06	0,38
	230	1,00	2,50	5,02	4,40	1,94	0,18	0,62	2,40	0,32
	241,5	1,00	2,10	4,00	3,98	1,60	0,02	0,52	2,10	0,20
	253	1,00	1,78	3,76	3,64	1,04	0,06	0,32	2,18	0,26
CsL2	207	1,00	3,68	6,46	4,94	3,06	0,14	0,52	2,10	0,70
	218,5	1,00	3,18	5,74	4,10	2,60	0,14	0,54	1,38	0,34
	230	1,00	2,36	4,28	3,74	1,48	0,20	0,32	2,02	0,44
	241,5	1,00	1,84	3,82	3,50	0,96	0,14	0,26	2,32	0,52
	253	1,00	1,38	2,88	3,10	0,56	0,04	0,22	1,96	0,18
L1	207	1,00	3,66	5,00	3,44	3,48	0,32	1,14	0,10	0,00
	218,5	1,00	2,68	3,62	2,72	2,08	0,14	0,54	0,18	0,00
	230	1,00	2,66	2,62	2,86	1,94	0,08	0,36	0,28	0,00
	241,5	1,00	2,12	2,58	2,44	1,20	0,00	0,08	0,32	0,00
	253	1,00	1,62	2,22	1,92	0,62	0,02	0,02	0,32	0,00

Tabulka 8.9: Četnosti přechodů mezi stavy, průměr 12. zářivek (zářivka 1÷12, 12×10×5 měření)

		Četnost přechodů během jednoho startu								
		S0>S1	S1>S2	S2>S3 S3>S2	S2>S4	S4>S1	S2>S1	S1>S4	S4>S2	S2>S5 S5>S4
Zapojení:	Napětí [V]:	P1	P2	P3	P4	P6	P7	P8	P9	P14
CpL1	207	1,00	4,76	5,76	4,89	5,62	0,22	2,04	0,35	0,00
	218,5	1,00	3,69	4,78	3,81	2,94	0,24	0,49	0,38	0,00
	230	1,00	2,81	3,79	3,04	2,12	0,13	0,44	0,37	0,00
	241,5	1,00	2,17	3,10	2,44	1,28	0,08	0,19	0,36	0,00
	253	1,00	1,59	2,60	1,86	0,64	0,05	0,10	0,35	0,00
CpL2	207	1,00	5,15	7,33	5,52	6,00	0,36	2,21	0,47	0,00
	218,5	1,00	3,92	5,51	4,06	3,54	0,27	0,88	0,41	0,00
	230	1,00	2,93	4,31	3,19	2,21	0,10	0,38	0,35	0,00
	241,5	1,00	2,10	3,63	2,37	1,27	0,11	0,28	0,38	0,00
	253	1,00	1,71	2,88	1,98	0,80	0,04	0,14	0,33	0,00
CsL1	207	1,00	3,69	6,04	4,71	2,96	0,30	0,56	1,81	0,45
	218,5	1,00	2,68	4,71	3,49	1,81	0,26	0,38	1,35	0,30
	230	1,00	2,10	4,02	3,04	1,28	0,15	0,32	1,30	0,21
	241,5	1,00	1,75	3,26	2,67	0,90	0,08	0,23	1,21	0,22
	253	1,00	1,57	3,06	2,48	0,77	0,07	0,27	1,19	0,21
CsL2	207	1,00	2,92	5,64	3,63	2,04	0,15	0,27	1,26	0,40
	218,5	1,00	2,46	4,82	3,02	1,64	0,17	0,34	1,01	0,29
	230	1,00	2,00	3,90	2,69	1,11	0,12	0,23	1,11	0,30
	241,5	1,00	1,67	3,42	2,44	0,75	0,10	0,18	1,11	0,25
	253	1,00	1,47	2,92	2,27	0,58	0,07	0,18	1,06	0,19

L1	207	1,00	4,43	5,84	4,51	4,34	0,26	1,18	0,35	0,00
	218,5	1,00	3,19	4,36	3,36	2,73	0,18	0,71	0,35	0,00
	230	1,00	2,80	3,59	3,00	2,04	0,17	0,41	0,37	0,00
	241,5	1,00	2,06	2,86	2,28	1,19	0,09	0,22	0,31	0,00
	253	1,00	1,59	2,67	1,82	0,62	0,04	0,08	0,30	0,00

8.5 Start elektronického předřadníku

Tabulka 8.10: Hodnoty získané kanálem 1 pro celý žhavicí proces startování zářivky

KANÁL 1 (levé vlákno) - celé žhavení (koncový bod U > 14V)											
měření	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ø
t_z [s]	1,0038	0,9969	0,9961	0,9956	0,9958	0,9948	0,9947	0,9946	0,9944	0,9902	1
E [J]	1,5848	1,4837	1,4808	1,4776	1,475	1,4677	1,4703	1,4618	1,4678	1,4074	1,48
R_C [Ω]	2,19	2,12	2,25	2,07	2,06	2,06	2,33	2,31	2,15	1,93	2,15
R_H [Ω]	8,67	8,25	8,28	8,30	8,24	8,17	8,27	8,18	8,29	7,89	8,25
R_H / R_C	3,96	3,89	3,69	4,01	4,00	3,97	3,55	3,54	3,86	4,09	3,86

Tabulka 8.11: Hodnoty získané kanálem 2 pro celý žhavicí proces startování zářivky

KANÁL 2 (pravé vlákno) - celé žhavení (koncový bod U > 14V)											
měření	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ø
t_z [s]	0,9968	1,0027	0,9957	0,9957	0,9956	0,9945	0,9946	0,9897	0,9944	0,9897	0,99
E [J]	1,3954	1,4792	1,3824	1,3759	1,3752	1,3716	1,3688	1,3079	1,3634	1,31	1,37
R_C [Ω]	1,95	2,08	1,87	2,06	1,88	1,89	1,96	1,82	1,82	1,84	1,92
R_H [Ω]	7,55	7,97	7,48	7,50	7,59	7,55	7,47	7,21	7,46	7,11	7,49
R_H / R_C	3,87	3,82	4,01	3,64	4,03	4,00	3,80	3,96	4,09	3,86	3,91

Struktura příloh na DVD

Seznam adresářové struktury DVD:

Dokumenty – v tomto adresáři je uložena dokumentace diplomové práce

Program – zde se nachází program pro detekci jednotlivých stavů, vyhodnocení
výsledných grafů, výpočet parametrů zářivkového svítidla

Data – zde jsou uložena naměřená data

Histogramy – tento adresář obsahuje histogramy z naměřených dat